



Tiago Craveiro Joaquim

**Caracterização mecânica de redes
electrossoldadas em Aço A500NR SD
por resistência**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Presidente: José Fernando de Almeida Dias, Professor Doutor, FCT-UNL
Arguente: Francisco Manuel Braz Fernandes, Professor Doutor, FCT-UNL
Orientador: Jorge Joaquim Pamies Teixeira, Professor Doutor, FCT-UNL
Co-orientadora: Rosa Maria Mendes Miranda, Professor Doutor, FCT-UNL



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Novembro 2011

Tiago Craveiro Joaquim
Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE
REDES ELECTROSSOLDADAS EM
AÇO A500NR SD POR RESISTÊNCIA**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de
Lisboa para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Novembro 2011

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE REDES ELECTROSSOLDADAS EM AÇO A500NRSD POR RESISTÊNCIA

Copyright @ Tiago Craveiro Joaquim, FCT /UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Os meus mais sinceros agradecimentos ao meu orientador Professor Doutor Pamies Teixeira, pela ajuda que sempre me dedicou e pelo empenho nos esclarecimentos das inúmeras dúvidas que me permitiram a conclusão deste trabalho.

À minha co-orientadora Professora Doutora Rosa Miranda, agradeço igualmente o acompanhamento e a solicitude prestada em vários domínios do trabalho.

Uma grande palavra de apreço ao Eng.º Pedro Rodrigues da Codimetal, pela constante disponibilidade e pela preciosa ajuda que me deu.

Agradeço ao Professor Doutor Nuno Leal e ao Professor Doutor João Pedro Botelho pela disponibilidade e ajuda na caracterização química do material.

Agradeço à Eng.^a Teresa Pires, à Eng.^a Ana Geirinhas e a todos os técnicos e funcionários da Codimetal pela informação, disponibilidade e ajuda prestadas.

Agradeço aos meus colegas de curso e grandes amigos Nuno, João, Francisco, Gonçalo, Ricardo, que me acompanharam neste trajecto, e que ao partilhar comigo as suas ideias, experiências, opiniões e dificuldades, contribuíram fortemente para o meu desenvolvimento pessoal e intelectual.

Aos meus familiares, pela sua constante presença e amizade, em especial à minha prima Rita.

Agradeço de um modo especial à minha namorada Maria, pelo apoio diário e que à sua maneira também contribuiu decisivamente para a realização deste trabalho.

O maior agradecimento fica para os meus pais, pelo apoio e amizade que me transmitem diariamente, pelo esforço que sempre me dedicaram e por serem o que são.

Desejo agradecer às seguintes instituições e empresas:

À Codimetal Industries, S.A.

Ao CENIMAT – Centro de Investigação em Materiais da Faculdade de Ciência e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL).

Ao Centro de Investigação em Ciência e Engenharia Geológica da Faculdade de Ciência e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL).

RESUMO

A soldadura por resistência por pontos de malhas metálicas para construção civil é um processo bastante utilizado a nível industrial.

Neste sector, qualquer estrutura de betão, possui no seu núcleo, uma estrutura de aço ou de outro tipo de material, que a torna capaz de suportar diversos tipos de esforço. Com base neste facto, a rede electrossoldada deve ser fabricada de maneira a suportar as condições, características e regulamentos do local de construção da estrutura. Desta forma, e devido à sua facilidade de parametrização para a obtenção de resultados aceitáveis, poucos são os estudos que caracterizam mecanicamente a influência dos parâmetros na resistência da junta e nas propriedades dos varões.

Neste estudo foram soldados varões de aço *A500NRSD* com diâmetros de 6 mm e de 8 mm, com o objectivo de quantificar a influência de cada parâmetro (corrente, tempo e força de aperto) na força de corte da soldadura e características mecânicas do varão, sendo utilizado para o efeito, um planeamento composto central circunscrito.

Através dos dados adquiridos ao longo do processo de soldadura, estudou-se o comportamento da resistência eléctrica dinâmica, que se verificou diminuir quando se aumenta a força de aperto.

Com base no estudo efectuado, conclui-se que o grau de influência dos parâmetros de soldadura por resistência por pontos na qualidade da soldadura, varia com o diâmetro do varão.

PALAVRAS-CHAVE

Soldadura por resistência por pontos

Varões electrossoldados

Redes electrossoldadas

Características mecânicas

Força de corte de soldadura

Função resposta

Resistência eléctrica dynamic

ABSTRACT

Cross wire resistance spot welding is in industry a widely used process and finds major applications in construction sector.

A concrete structure has a steel (or other material) network, in its core that provides the required capability to support several types of stresses. So, electro welded networks have to be manufactured to withstand the conditions and regulations of the construction site characteristics. However, despite the interest of this subject there are few studies that characterize mechanically the influence of processing parameters on the joint strength and rod properties.

In this study, A500NRSD steel rods with diameters of 6 and 8 mm were welded in order to quantify the influence of each processing parameter (current, time and clamping force) on the shear strength of the weld and mechanical characteristics of rod. For this, a central composite design, was used.

Using the data acquired during the welding process, the electrical dynamic resistance behavior, was studied which decreases when increasing the clamping force. Mechanical resistance of the joints was also investigated.

It was concluded that the major processing parameter is the current intensity for rods until 6 mm diameter, while for rods of 8 mm, the welding time has higher influence on the shear force.

KEY-WORDS

Resistance spot welding

Electro welded rods

Electro welded networks

Mechanical characteristics

Weld shear strength

Response function

Electrical dynamic resistanc

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
PALAVRAS-CHAVE.....	iii
Abstract	v
KEY-WORDS.....	v
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas.....	xi
Lista de Acrónimos	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Estrutura da Tese.....	2
2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	3
2.1 Parâmetros da Soldadura por Resistência	4
2.1.1 Intensidade de Corrente.....	4
2.1.2 Tempo de soldadura	5
2.1.3 Resistência de contacto	6
2.1.4 Superfície de contacto	8
2.1.5 Eléctrodos.....	9
2.1.6 Equipamento de soldadura	10
2.2 Soldadura por pontos múltiplos.....	11
2.3 Redes electrossoldadas	12
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	13
3.1 Material	13
3.1.1 Características físicas e químicas	13
3.1.2 Características mecânicas.....	15
3.2 Equipamento Experimental	17
3.2.1 Equipamento de soldadura	17

3.2.2	Equipamento de controlo e aquisição de dados.....	20
3.2.3	<i>Software</i> de tratamento de dados.....	23
3.2.4	Equipamento de caracterização mecânica.....	24
3.3	Planeamento	25
3.4	Métodos Experimentais.....	29
3.4.1	Elaboração de provetes.....	29
3.4.2	Ensaio de tracção.....	31
3.4.3	Ensaio de corte ou arranque de soldadura.....	32
3.4.4	Ensaio de dobragem	33
3.4.5	Ensaio oligocíclico	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Ensaaios	37
4.2	Características mecânicas do material.....	40
4.3	Características da soldadura: força de corte de soldadura.....	42
4.3.1	Tabelas ANOVA	43
4.3.2	Funções resposta	44
4.3.3	Influência dos parâmetros de soldadura	45
4.3.4	Influência do estado dos eléctrodos.....	52
5	CONCLUSÕES e desenvolvimentos futuros.....	55
5.1	Conclusões	55
5.2	Desenvolvimentos futuros.....	55
6	Bibliografia	57
	ANEXOS.....	I
A1	Resultados dos ensaios preliminares de força de corte de soldadura para varões de 10 mm de diâmetro.....	II
A2	Resultados dos ensaios de despistagem para varão de 6 mm.....	III
A3	Resultados dos ensaios de despistagem para varão de 8 mm.....	IV

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de correntes aplicadas na soldadura por resistência [6].....	4
Figura 2.2 – Diagrama de processo de uma SRP [11].....	6
Figura 2.3 - Resistência de contacto: R1, R3- interface eléctrodo–metal R2 – interface metal – metal [1]	6
Figura 2.4- Variação de resistência de contacto em aços macios [12].....	7
Figura 2.5 - Curvas de deslocamento de eléctrodos para diferentes revestimentos de superfície [13].....	8
Figura 2.6 - Tipos de ponta de eléctrodos [14].....	9
Figura 2.7 - Perfil da força durante as fases de aperto e de soldadura [1].....	10
Figura 2.8 - Expulsão de material [1].....	10
Figura 2.9 - Exemplo de equipamento de soldadura indirecta por pontos múltiplos [16]	11
Figura 2.10 - Exemplo de equipamento de soldadura directa por pontos múltiplos [16].....	11
Figura 2.11 - Exemplos de aplicações de rede electrossoldada.....	12
Figura 3.1 - Vista da secção transversal do varão [18]	13
Figura 3.2 - Protótipo de SRP	17
Figura 3.3 - Armário de comando	18
Figura 3.4 - Esquema eléctrodos	18
Figura 3.5 – Macaco hidráulico acoplado na estrutura	19
Figura 3.6 – Esquema do circuito hidráulico	19
Figura 3.7 - Sensor de força	20
Figura 3.8 - Interface do programa de aquisição de dados e controlo de soldadura	21
Figura 3.9 - Janela de configuração da soldadura do programa <i>BOS-5000</i>	21
Figura 3.10 – Modulação da corrente através do <i>hardware</i> de controlo.....	22
Figura 3.11 - Janela de captura do osciloscópio.....	23
Figura 3.12 - Equipamento de dobragem manual	24
Figura 3.13 – Composto Centrado Circunscrito para $k = 2$ e $k = 3$ [21].....	26
Figura 3.14 - Provete tipo 2 colocado na máquina de ensaios de tracção	31
Figura 3.15 - Resultado do ensaio de tracção.....	32
Figura 3.16 - Esquema de aplicação das forças de tracção de modo a criar forças de corte no ponto de soldadura [19].....	32
Figura 3.17 - Provete tipo 1 colocado no equipamento para ensaio de arranque de soldadura... 33	
Figura 3.18 - Esquema de dobragem a três pontos [19].....	34
Figura 3.19 - Esquema ilustrativo dos diferentes estados do processo de dobragem.....	34
Figura 3.20 - Provete tipo 3 colocado na máquina de ensaios de tracção para o ensaio oligocíclico.....	35

Figura 3.21 - Resultado impresso do ensaio oligocíclico.....	35
Figura 4.1 - Durezas dos varões de 6 mm e 8 mm	41
Figura 4.2 - Variação da força de soldadura, com variação de corrente, para varões de 6 mm ..	46
Figura 4.3 - Variação da força de soldadura, com variação de tempo, para varões de 6 mm	47
Figura 4.4 - Variação da força de soldadura, com força de aperto constante de 5,838kN, para varões de 6 mm	47
Figura 4.5 - Variação da força de soldadura, com corrente constante de 9,944kA, para varões de 8 mm	48
Figura 4.6 - Variação da força de soldadura, com tempo constante de 180ms, para varões de 8 mm	48
Figura 4.7 - Variação da força de soldadura, com força de aperto constante de 9,313kN, para varões de 8 mm	49
Figura 4.8 - Relação cruzada entre a corrente e tempo de soldadura para varão de diâmetro de 6 mm	50
Figura 4.9 - Resistência dinâmica em relação ao tempo e força de aperto para varão de 6 mm de diâmetro.....	51
Figura 4.10 - Resistência dinâmica em relação ao tempo e força de aperto para varão de 8 mm de diâmetro.....	51
Figura 4.11 - Área de contacto expectável entre varões em diferentes fases da soldadura.....	52
Figura 4.12 - Força de corte relativa aos ensaios realizados com eléctrodos usados (ensaios 44 e 53) e limpos (ensaios 45 e 54).....	53
Figura 4.13 - Calor gerado durante a soldadura com eléctrodos usados e limpos para varão de 8 mm	53
Figura 4.14 - Calor gerado durante a soldadura com eléctrodos usados e limpos para varão de 6 mm	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composições, propriedades e aplicações de certos eléctrodos [4].....	9
Tabela 3.1 - Valores nominais e tolerâncias [18].....	14
Tabela 3.2 - Composição química do varão A500 NR SD [18].....	14
Tabela 3.3 - Resultados do ensaio de faíscamento para varão de 6 mm e de 8 mm.....	14
Tabela 3.4 - Resultados do ensaio de fluorescência de raios X para varão de 6 mm e de 8 mm	15
Tabela 3.5 - Características mecânicas [18].....	15
Tabela 3.6 - Diâmetros dos mandris e respectivos ângulos de dobragem utilizados nos ensaios de dobragem e de dobragem-desdobragem [18]	16
Tabela 3.7 - Condições do ensaio de fadiga [18]	16
Tabela 3.8 - Condições do ensaio cíclico alternado [18]	16
Tabela 3.9 - Planeamento 1 – CCC com 5 níveis e 4 variáveis.....	27
Tabela 3.10 - Planeamento 2 - 3^{k-p} com 3 níveis e 4 variáveis.....	27
Tabela 3.11 - Planeamento Final – 2 CCC com 5 níveis e 3 variáveis	28
Tabela 3.12 - Tipos de dimensões para a realização de provetes	29
Tabela 3.13 - Tipos de provetes	29
Tabela 3.14 - Plano de ensaios definido aleatório através do <i>software STATISTICA</i>	30
Tabela 3.15 - Correspondência de diâmetro de varão com o de mandril	34
Tabela 4.1 – Resultados de todos os ensaios efectuado e a correspondente aprovação para varão de 6 mm.....	37
Tabela 4.2 - Resultados de todos os ensaios efectuado e a correspondente aprovação para varão de 8 mm.....	38
Tabela 4.3 - Limites de características mecânicas de aprovação referente à norma LNEC, para varão de 6 mm.....	39
Tabela 4.4 - Limites de características mecânicas de aprovação referente à norma LNEC, para varão de 8 mm.....	39
Tabela 4.5 - Média e desvio padrão das características mecânicas provenientes dos provetes de 6 mm e respectivas taxas de aprovação.....	40
Tabela 4.6 - Média e desvio padrão das características mecânicas provenientes dos provetes de 8 mm	40
Tabela 4.7 - Taxa de aprovação do ensaio de dobragem para ambos os diâmetros de provetes .	41
Tabela 4.8 - Discrepância de valores de forças de corte de soldaduras para varão de 6 mm.....	42
Tabela 4.9 - Tabela ANOVA referente aos factores influente na força de corte de soldadura para varão de 6 mm (<i>STATISTICA</i>)	43
Tabela 4.10 - Tabela de efeitos estimados referente aos factores mais influentes na força de corte de soldadura para varão de 6 mm (<i>STATISTICA</i>)	43

Tabela 4.11 - Tabela ANOVA referente aos factores influente na força de corte de soldadura para varão de 8 mm (<i>STATISTICA</i>).....	44
Tabela 4.12 - Tabela de efeitos estimados referente aos factores mais influentes na força de corte de soldadura para varão de 8 mm (STATISTICA)	44

LISTA DE ACRÓNIMOS

Agt	Extensão total na força máxima
ASTM	Associação Americana para testes e materiais (American Society for testing and materials)
CA	Corrente alterna
CC	Corrente contínua
CCC	Composto Central Circunscrito
CD	Descarga capacitiva
DQSK	Aço ao carbono
DQSK-EG	Aço ao carbono galvanizado por electrodeposição
DQSK-HD	Aço ao carbono galvanizado por imersão a quente
ER	Varões com superfícies sem nervuras
F	Força de aperto
Fcorte	Força de corte de soldadura
I	Corrente
MFDC	Corrente pulsada de alta frequência (<i>Mid frequency direct current</i>)
N _{aqui}	Número de aquisições
NI	National Instruments
NR	Varões com superfícies nervuradas
Ø	Diâmetro
Q	Calor
R _e	Tensão de cedência
R _{e4}	Tensão de cedência inferior
R _{eH}	Tensão de cedência superior
R _m	Tensão de rotura
RMS	Raiz quadrada da média da soma dos quadrados (<i>Root mean square</i>)
SD	Ductilidade especial
SRP	Soldadura por resistência por pontos
t	Tempo
ZTA	Zona termicamente afectada

γ	Ângulo de dobraagem
δ	Ângulo de desdobraagem
σ_{\max}	Tensão máxima
σ_{\min}	Tensão mínima

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O aço A500 NR SD possui características metalúrgicas que dificultam a sua soldabilidade em processos de soldadura por resistência dos varões constitutivos da malha electrossoldada. Este processo depende fortemente da intensidade da corrente, do tempo de descarga, da força de contacto e da resistência de contacto. Em particular esta última, é difícil de caracterizar de forma determinística.

A fiabilidade e reprodutibilidade são duas das vantagens da soldadura por resistência que são afectadas, pela aplicação deste processo à produção de redes electrossoldadas. Tal pode derivar da origem do material base, já que este é reciclado e proveniente de sucatas.

Devido à facilidade com que se obtêm redes com boas propriedades mecânicas, o estudo teórico deste processo foi negligenciado durante anos. Como o crescimento desta tecnologia se deveu particularmente na indústria automóvel, grande parte dos estudos existentes sobre soldadura por resistência por pontos (SRP) encontrados na literatura incidem sobre soldadura de chapas

Uma vez que o equipamento para a produção de malhas electrossoldadas tem a capacidade de realizar cerca de 3500 pontos de soldadura-minuto, o conhecimento mais aprofundado deste processo, permitirá reduzir o tempo de produção e a energia despendida no processo, com a consequente redução nos custos.

Este trabalho teve a colaboração da empresa *Codimetal*, uma empresa produtora e exportadora de malhas electrossoldadas para a construção civil.

1.2 Objectivos

Este estudo tem por objectivo analisar a influência dos parâmetros referidos, no comportamento mecânico dos pontos de soldadura, de modo a permitir um modelo que estabeleça aprioristicamente a melhor relação entre os mesmos, mantendo as características mecânicas da soldadura dentro dos limites impostos pelos regulamentos relativos a redes electrossoldadas.

Outro dos objectivos é estudar o comportamento da resistência dinâmica e o grau de influência da força de aperto sobre esta, ao longo do processo de soldadura.

Para este estudo de cariz experimental realizaram-se ensaios de soldadura e mecânicos, designadamente de tracção, de dobragem simples, oligocíclico e de corte da soldadura associados às especificações E460-2010 e E458-2008 do *LNEC*, todos eles efectuados segundo as normas respectivas e com o material no seu estado de fornecimento.

1.3 Estrutura da Tese

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos.

O primeiro, aborda resumidamente as motivações pelas quais se realizou este estudo, os objectivos da sua realização.

No capítulo seguinte sintetizam-se os conceitos relativos à soldadura por resistência e redes electrossoldadas, fundamentados na pesquisa bibliográfica efectuada.

No terceiro capítulo descreve-se a caracterização do material, o equipamento de soldadura e os ensaios mecânicos efectuados, assim como todo o *software* de apoio à realização deste estudo.

Este capítulo inclui uma secção sobre planeamento, onde se descreve justificadamente as diferentes etapas, concluído com os métodos experimentais, onde se engloba a preparação e realização de provetes, e ainda os métodos de ensaios.

Os resultados são apresentados e discutidos no capítulo quatro e estão divididos em três secções: a primeira com os resultados dos ensaios efectuados; a segunda com uma análise destes relativamente a características mecânicas do material; e a terceira e última com as características da soldadura (força de corte) em relação aos parâmetros considerados.

Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões, confrontando os resultados obtidos com os objectivos iniciais referindo ainda objectivos para futuros trabalhos.

2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Soldadura é definida como um processo de ligação permanente entre dois componentes. Pode ser efectuada por aplicação de calor, pressão ou ambos, com ou sem adição de material. A soldadura é um processo tecnológico, isto é, todos os aspectos relacionados com esta tecnologia podem ser relacionados com as propriedades dos metais envolvidos, com as propriedades dos componentes e dos eléctrodos [1].

Com a descoberta da soldadura por resistência eléctrica em 1886 por Elihu Thomson [2], abriu-se um leque de possibilidades de soldar os mais diversos materiais até à data impossíveis. Este processo e suas variantes veio dar um grande contributo no desenvolvimento industrial de então. Juntando à elevada velocidade de processamento o facto de não necessitar de material de adição, torna este método altamente económico.

Em 1898 aparece a primeira utilização da SRP. Mais tarde, em 1915, é implementada na indústria automóvel, o que veio trazer desenvolvimento de novos processos.

Durante a Segunda Grande Guerra a forte necessidade de produção de transportes bélicos levou à implementação em larga escala da soldadura por resistência.

Mais uma vez após uma grande guerra existe um grande desenvolvimento tecnológico que no fim desta se aplica à indústria [3].

A soldadura por resistência baseia-se no Efeito de Joule (Equação 2.1), isto é, na quantidade de calor (Q) gerado pela passagem de corrente (I) através de um meio resistivo. Esta resistência existe na zona de contacto entre as peças a soldar, sendo aí que se desenvolve o calor necessário para obter a fusão local do material e a consequente soldadura [1].

$$Q = I^2 \cdot t \cdot R \quad \text{Equação 2.1}$$

A soldadura por resistência tem diversas variantes, sendo a soldadura por pontos uma das mais utilizadas a nível industrial, que também é utilizada nesta dissertação. Este processo é bastante produtivo, fiável e reprodutível. com um custo de produção reduzido. A elevada gama de variantes possibilita a sua adaptação em qualquer situação, conjugando peças de diversas geometrias e composições químicas, que seriam impossíveis de soldar através de outros processos. Por outro lado, devido à fiabilidade e reprodutibilidade referidas anteriormente é um processo com grande capacidade de automatização. As suas principais desvantagens são a impossibilidade de efectuar soldaduras de elevadas espessuras, alta especialização na sua manutenção e quando necessário, uma preparação especial nas superfícies de certos materiais [4].

A qualidade é alcançada através de uma manipulação correcta de um conjunto de parâmetros, nomeadamente, a intensidade da corrente, o tempo de duração da corrente e da resistência de contacto, sendo que este último, depende de vários factores, entre os quais, a força de contacto, a geometria das peças, as propriedades termofísicas do material [3,5].

2.1 Parâmetros da Soldadura por Resistência

Os princípios da soldadura por resistência são baseados na lei de Joule onde Q é a quantidade de calor gerado, que depende de três factores básicos expressos na Equação de Joule (Equação 2.1).

Apesar de simples, o processo de soldadura tem diversos parâmetros, entre os quais [6] :

- Intensidade de corrente;
- Tempo de soldadura;
- Resistência de contacto;
- Superfície de Contacto;
- Eléctrodos;
- Equipamento de Soldadura.

Descritos seguidamente.

2.1.1 Intensidade de Corrente

Este é o parâmetro mais influente neste processo de soldadura, que determina a quantidade de calor gerada (Q), com um efeito quadrático como decorre da Equação 2.1. O tamanho do núcleo de soldadura aumenta rapidamente com o aumento da corrente, no entanto, se a corrente for muito elevada haverá expulsão de material e deterioração dos eléctrodos [1].

A Figura 2.1 mostra os tipos de corrente tipicamente aplicados na soldadura por resistência, que pode ser alterna (CA), contínua (CC), descarga capacitiva (DC), e a corrente pulsada de alta frequência (MFDC – *Mid frequency direct current*) [6].

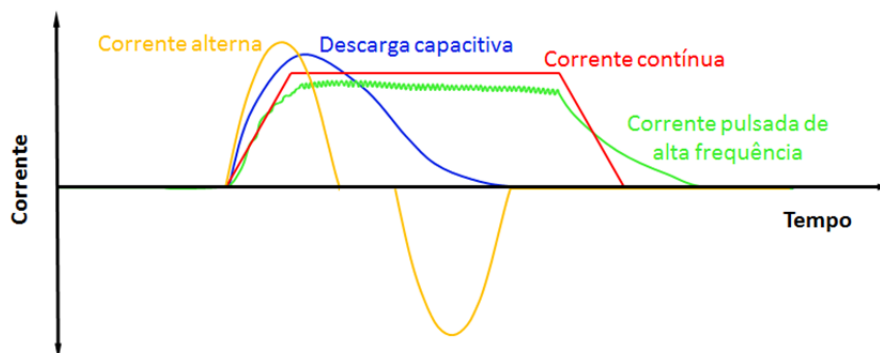


Figura 2.1 - Tipos de correntes aplicadas na soldadura por resistência [6].

A maior parte das máquinas de soldadura por resistência utiliza corrente alterna (CA). O transformador converte a tensão da rede eléctrica para uma baixa tensão e fornece corrente de elevada intensidade necessária para efectuar a soldadura [7]. O seu factor de potência situa-se entre os 40% e 50%.

Relativamente a sistemas de corrente contínua (CC) a energia é fornecida directamente da rede eléctrica e rectificada. É um processo com o dobro do factor de potência, conforme referido no processo de corrente alterna, mas em contrapartida, tem um custo mais elevado, tanto ao nível de equipamento, como de instalação e manutenção.

Quanto à corrente de descarga capacitiva (DC), esta é utilizada para reduzir custos, visto que acumula e armazena energia para posterior descarga no momento de efectuar a soldadura.

Finalmente, a corrente pulsada de alta frequência (*MFDC*), utiliza corrente contínua (após rectificadores e condensadores) que por meio de osciladores, é repetidamente ligada e desligada, gerando uma corrente pulsada de frequência variável [8]. O transformador *MFDC* é semelhante ao transformador de CA, com a diferença de que o tamanho do núcleo do mesmo é mais pequeno, visto que o seu controlador gera pulsos de frequências entre 400 e os 2000Hz, em vez dos 50 a 60 Hz da CA [5].

Desta forma é gerada uma corrente bastante semelhante à corrente contínua [9]. Este tipo de corrente torna este sistema ideal para processos automatizados, por ser um sistema de rápida reacção a alterações na resistência de contacto durante o processo de soldadura [10].

2.1.2 Tempo de soldadura

No início de cada soldadura a geração de calor provém essencialmente da resistência de contacto e da respectiva passagem de corrente, sendo que a quantidade de calor gerada depende, para além destes, do tempo, como mostra a equação de *Joule* (Equação 2.1).

Como se sabe, a transferência de calor é uma função do tempo e tem grande influência no desenvolvimento de um núcleo de soldadura. Independentemente da corrente, para uma formação adequada do núcleo é necessário um tempo mínimo [7].

A temporização de aplicação de força é importante, uma vez que esta deve estar estabilizada no momento anterior e posterior à soldadura. Nesta última fase dá-se o arrefecimento do núcleo de soldadura, sendo necessário um tempo de espera adequado de modo a efectuar a solidificação, como se pode ver na Figura 2.2 caso contrário poderá ocorrer fendas [1].

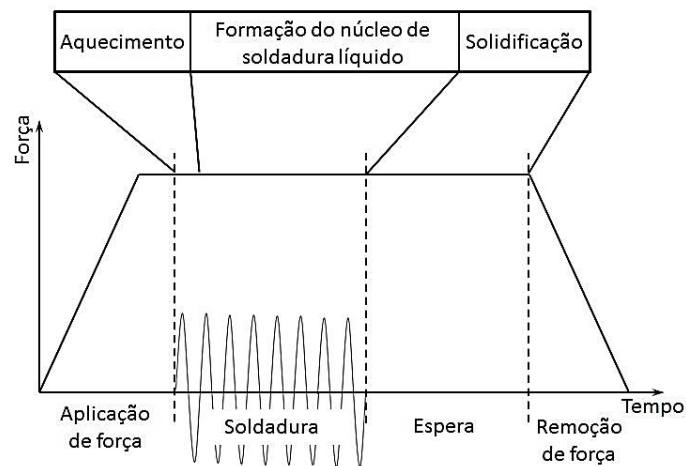


Figura 2.2 – Diagrama de processo de uma SRP [11]

2.1.3 Resistência de contacto

A resistência de contacto é também um parâmetro de processo relevante. Esta resistência é provocada pela interface de contacto entre as duas partes a soldar.

De modo a existir maior geração de calor na interface das peças a soldar, a resistência de contacto entre estas (R2 - Figura 2.3) deve ser bastante superior à resistência produzida na zona de contacto eléctrodo-peça (R1, R3 - Figura 2.3) [1].

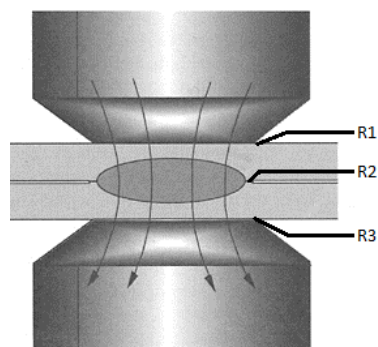


Figura 2.3 - Resistência de contacto:
R1, R3- interface eléctrodo-metal
R2 – interface metal – metal [1]

A Figura 2.4 mostra a variação da resistência de contacto de um aço macio a diferentes temperaturas e diferentes pressões proveniente de um estudo [12].

Assim, a temperatura influencia a resistência de contacto, uma vez que, com o aumento de temperatura existe alteração das propriedades mecânicas e eléctricas do material, nomeadamente, a dureza que diminui e a resistividade que aumenta. Mantendo uma pressão constante, esta diminuição da dureza irá aumentar a área de contacto, provocando uma diminuição da resistência de contacto. Por conseguinte, e uma vez que, a resistividade do material também influencia de forma oposta a resistência de contacto, não se pode afirmar que esta resistência diminui sempre com o aumento de temperatura [12].

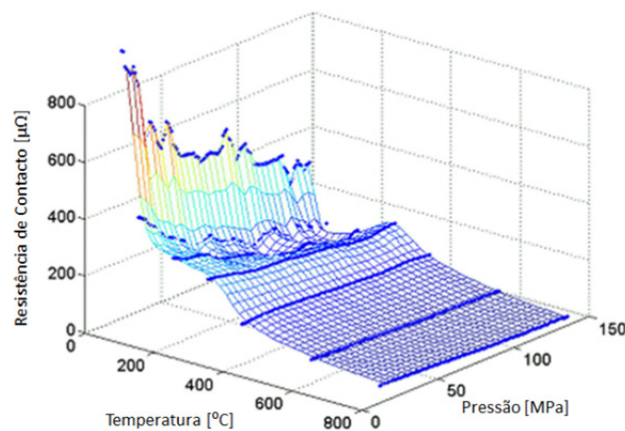


Figura 2.4- Variação de resistência de contacto em aços macios [12]

Outra conclusão retirada deste estudo [12], é o facto da resistência de contacto diminuir com o aumento da pressão. Como todos os metais têm superfícies rugosas, ao aumentar a força aplicada, a área real de contacto da zona a soldar aumenta, devido à deformação das irregularidades na superfície rugosa, implicando assim uma redução da resistência de contacto na zona a efectuar a soldadura, o que provoca a redução da quantidade de calor e do tamanho do núcleo de soldadura.

2.1.4 Superfície de contacto

Como foi referido anteriormente, a resistência de contacto de uma superfície tem um grau de influência significativo na geração de calor. No caso de superfícies revestidas, a resistência eléctrica no contacto do eléctrodo com o revestimento deverá ser igual ou inferior ao contacto correspondente do material de base, por forma a obter resultados de soldadura consistentes.

As superfícies devem ser libertas de material de alta resistência eléctrica, tais como: tinta, óxidos, óleo e gordura. Caso não seja possível a sua remoção, esta camada deve ser a mais fina possível, de modo a que a força de aperto dos eléctrodos seja capaz de destruir a camada resistiva e melhorar o contacto metal-metal [7].

Como foi estudado por *Min Jou* [13], a Figura 2.5 mostra a deslocação dos eléctrodos ao longo do processo de SRP e onde é utilizado o mesmo tipo de aço com diferentes tipos de revestimento.

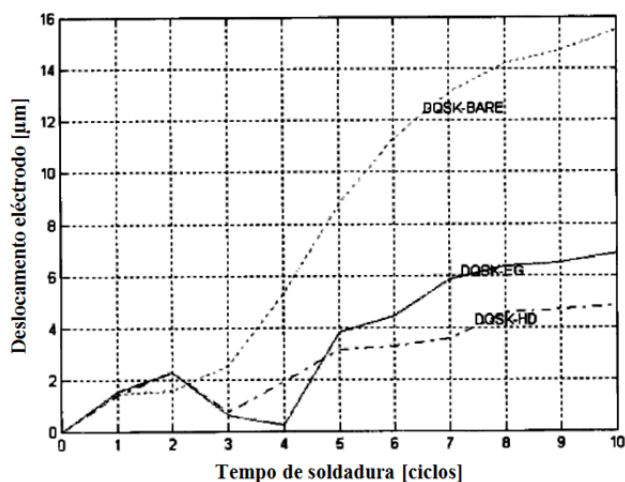


Figura 2.5 - Curvas de deslocação de eléctrodos para diferentes revestimentos de superfície [13]

Da Figura 2.5 pode ver-se, que para o aço sem revestimento (*DQSK* – aço ao carbono) existe um deslocação maior e mais rápida dos eléctrodos, comparativamente aos aços revestidos (*DQSK-EG* – aço ao carbono galvanizado por electrodeposição e *DQSK-HD* – aço ao carbono galvanizado por imersão a quente), uma vez que é necessário gerar mais calor para remover ou fundir os revestimentos de superfície.

No caso mencionado, o deslocação dos eléctrodos começa a expandir continuamente a partir do segundo ciclo de soldadura, no aço sem revestimento, enquanto nos aços com revestimento esta expansão ocorre após o terceiro ou quarto ciclos. Este atraso na expansão dos eléctrodos deve-se ao facto da camada de zinco ter de ser removida (vaporizada) e afastada antes do material base entrar em contacto e fundir [13].

2.1.5 Eléctrodos

Os eléctrodos são componentes vitais para o processo de SRP e portanto, o material, geometria e dimensão são muito importantes para a realização de uma soldadura eficaz e com qualidade.

Sob o ponto de vista do material, os eléctrodos devem ter alta condutividade eléctrica e térmica de modo a minimizar as perdas por efeito de *Joule* e dissipar rapidamente o calor. Por outro lado, deverão possuir uma elevada resistência mecânica à deformação sob grandes pressões de aperto; manter as suas propriedades físicas a altas temperaturas; e minimizar a adesão com as superfícies da peça a soldar [10].

Tabela 2.1 - Composições, propriedades e aplicações de certos eléctrodos [4]

Eléctrodos	Propriedades	Aplicações
Cobre, 1% prata	Alta condutividade, dureza média	Ligas leves e aços revestidos
Cobre, 0.6% Cr ou 0.5% Cr e Be	Possui a melhor condutividade eléctrica com elevada dureza	Aço não oxidado ou pouco oxidado, latão e níquel. É usado nos braços das máquinas.
Cobre, 2.5% Co e 0.5 Be	Baixa condutividade mas elevada dureza	Para soldar metais muito duros com alta resistividade
Cobre e berílio	Baixa condutividade com melhor dureza que o anterior	Para garras de soldadura

A geometria e respectivas dimensões dos eléctrodos influenciam a distribuição da intensidade da corrente resultante das variações da área real de contacto [1]. Ou seja, diferentes pontas de eléctrodos (Figura 2.6) produzem pontos de soldadura diferentes

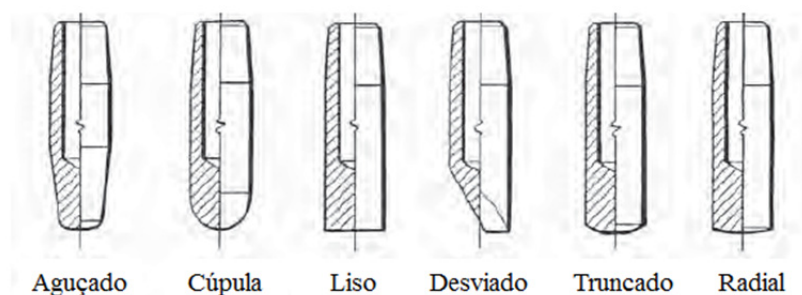


Figura 2.6 - Tipos de ponta de eléctrodos [14]

2.1.6 Equipamento de soldadura

As características mecânicas de um equipamento de soldadura têm também um efeito muito importante, especialmente em duas fases distintas: a de aplicação da força de aperto e a de soldadura (Figura 2.2).

Durante a fase de aperto, o eléctrodo move-se e ao tocar nas peças a soldar, provoca uma oscilação na força do eléctrodo seguida de um aumento oscilatório da mesma até à sua estabilização (Figura 2.7). Desta oscilação nada se concluiu sobre a influência directa na qualidade da soldadura, uma vez que ocorre antes da sua realização, mas sabe-se que resulta num desgaste dos eléctrodos, que ao longo do tempo irá prejudicar a qualidade da soldadura [15].

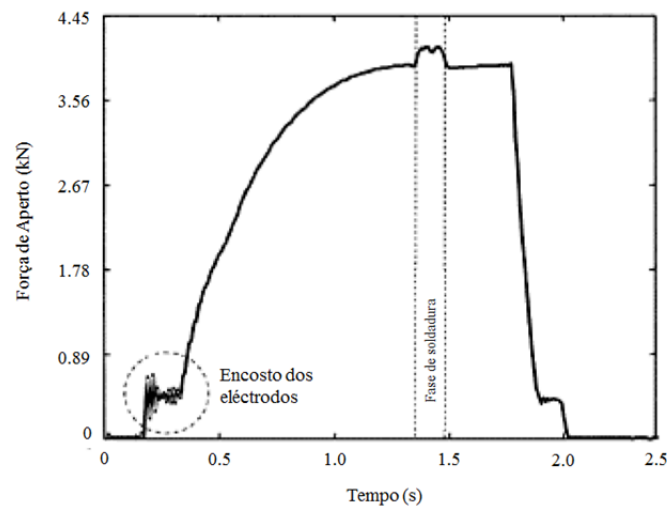


Figura 2.7 - Perfil da força durante as fases de aperto e de soldadura [1]

Na fase de soldadura, ao existir geração de calor, o material deforma-se plasticamente, o que provoca um movimento relativo dos eléctrodos, que deve ser compensado o mais rápido possível pelo sistema de carregamento para evitar a mínima perda de contacto do eléctrodo com a peça, causando uma má qualidade de soldadura [15] ou expulsões de material [1], que se ilustra na Figura 2.8.

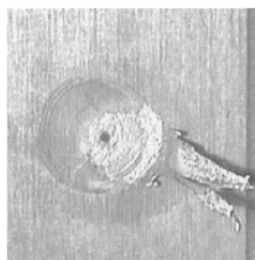


Figura 2.8 - Expulsão de material [1]

2.2 Soldadura por pontos múltiplos

A utilização de autómatos no processo de soldadura por resistência permitir aumentar a qualidade do processo. No caso de soldadura de varão, o processo pode ser realizado de forma directa ou indirecta.

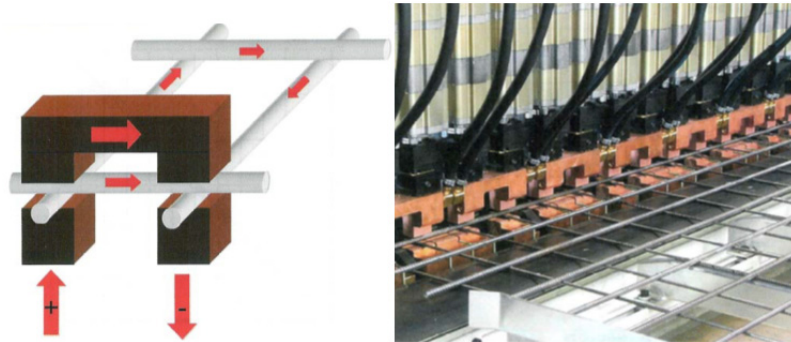


Figura 2.9 - Exemplo de equipamento de soldadura indirecta por pontos múltiplos [16]

Um dos sistemas mais usuais de soldadura indirecta, é a soldadura de um só lado (*One-sided welding*) que se utiliza na construção de redes de espaçamento limitado entre varões. Como se pode ver na Figura 2.9 os pólos eléctricos encontram-se no mesmo lado, o que permite a realização de duas soldaduras por impulso de corrente.

Este tipo de soldadura tende a fundir o material na zona de contacto do varão longitudinal com o eléctrodo. Este efeito deve-se ao facto de existir uma passagem sistemática de corrente através do varão transversal, como se pode ver pelas setas representadas na Figura 2.9 [16].

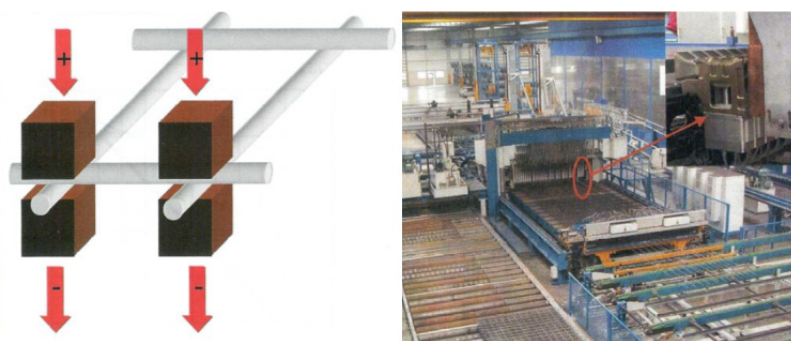


Figura 2.10 - Exemplo de equipamento de soldadura directa por pontos múltiplos [16]

Em relação à soldadura directa, os equipamentos possuem um número variável de secções de soldadura independentes (Figura 2.10), onde cada secção é um sistema auto-suficiente consistindo de um transformador, um macaco hidráulico e uma fonte de tensão.

Este tipo de sistema torna o processo muito flexível em termos de opções, nomeadamente, na distância entre varões longitudinais e na variação de diâmetros de varão ao longo da rede electrossoldada [16].

2.3 Redes electrossoldadas

Qualquer estrutura de betão, possui no seu núcleo, uma estrutura de aço ou de outro tipo de metal, que a torna numa estrutura sólida, flexível e capaz de suportar diversos tipos de esforços. A construção civil depende bastante do comportamento da estrutura metálica para a sua sustentação. As redes electrossoldadas possuem um papel fundamental na construção de lajes, pavimentos, muros, paredes, fundações, túneis, manilhas e até mesmo em elementos pré-fabricados.

Devido à sua importância na construção civil, existem normas que definem as condições que devem satisfazer as redes electrossoldadas. As normas e as condições variam de país para país, devido ao tipo de terreno, actividade sísmica e também devido ao clima.

As normas em vigor utilizadas neste caso de estudo, foi a E-458-2008 [17] e E-460-2010 [18], referente a redes electrossoldadas para armaduras de betão armado e cuja entidade responsável é o LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil). Estas especificações referem as características da rede, processo de fabrico, dimensões e tolerâncias da rede, características dos varões e também ensaios a realizar assim como as respectivas condições de ensaio.

Relativamente ao tipo de ensaios a realizar e às suas respectivas condições, esta especificação rege-se pela norma *ISO 15630-2 Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part2: Welded fabric* [19]. Para cada um destes ensaios existem valores mínimos de referência, também impostos pela especificação do LNEC. Assim, iremos descrever os tipos de ensaios incluídos nesta especificação.

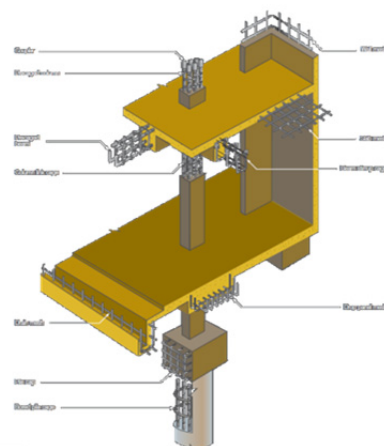


Figura 2.11 - Exemplos de aplicações de rede electrossoldada

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Material

Para o estudo realizado nesta tese, o material utilizado é o aço A500 NR SD. Este aço é laminado a quente, nervurado e de ductilidade especial, utilizado na produção de redes electrossoldadas para estruturas de betão armado.

A utilização deste aço para redes electrossoldadas, como já foi referido, segue a documentação normativa do *LNEC*, a especificação *E 460-2010* [18].

Os varões são produzidos por laminagem a quente a partir de semiprodutos (biletas) ou por vazamento contínuo. O material é laminado com arrefecimento imediato, ficando sujeito a uma recristalização dinâmica que lhe garante uma estrutura de grão bastante fina, originando propriedades especiais, designadamente de ductilidade. Posteriormente, é submetido a uma deformação a frio muito ligeira ($\leq 10\%$), o que permite um ligeiro endurecimento na periferia que, de outra forma, seria mais macia que o seu núcleo.

Os varões podem ser produzidos em troços rectilíneos ou em bobinas. Neste caso, como o endireitamento induz mais deformação a frio, deverá proceder-se a uma verificação que garanta as exigências da especificação.

3.1.1 Características físicas e químicas

Os valores nominais do diâmetro, da área da secção transversal e da massa por metro linear dos varões estão indicados na Tabela 3.1, considerando a massa específica do aço de 7.85 kg/dm^3 .



Figura 3.1 - Vista da secção transversal do varão [18]

Tabela 3.1 - Valores nominais e tolerâncias [18]

Diâmetro nominal (mm)	Área da secção transversal (mm ²)	Massa (kg/m)	Tolerância da massa (%)
6	28,3	0,222	± 4,5
8	50,3	0,395	
10	78,5	0,617	
12	113,0	0,888	
14	154,0	1,210	
16	201,0	1,580	
20	314,0	2,470	
25	491,0	3,850	
32	804,0	6,310	
40	1257,0	9,860	

Os valores máximos especificados para a composição química dos varões de aço, são especificados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Composição química do varão A500 NR SD [18]

Análise	C (%)	P (%)	S (%)	N ⁽¹⁾ (%)	Cu (%)	Ceq ⁽²⁾ (%)
Vazamento	0,220	0,050	0,050	0,012	0,800	0,500
Produto final	0,240	0,055	0,055	0,014	0,850	0,520

⁽¹⁾ Azoto livre. Se existirem, em quantidade suficiente, elementos fixadores de Azoto tais como Alumínio, Vanádio, etc., podem ser admitidos teores superiores.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad \text{Equação 3.1}$$

onde os símbolos dos elementos químicos representam os seus valores em percentagem.

A composição química do varão, foi analisada na *Codimetal* através de ensaios de faiscamento (análise quantitativa) no equipamento da *Oxford Instruments* e forneceu os seguintes resultados (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Resultados do ensaio de faiscamento para varão de 6 mm e de 8 mm

Elemento	6 mm	8 mm
	(%)	
Al	0,0424	0,0098
S	0,0566	0,0373
Cr	0,127	0,105
Mn	1,610	1,260
Fe	96,900	97,500
Cu	0,363	0,451
C	0,212	0,175
P	0,0331	0,0507
N	<0,003	<0,003

Foram ainda feitos, ensaios de fluorescência de raios X (análise semi-quantitativa) no *Cenimat* no espectrómetro PANalytical que forneceram os seguintes resultados (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Resultados do ensaio de fluorescência de raios X para varão de 6 mm e de 8 mm

Elemento	6 mm	8 mm
	(%)	
Al	2,00	2,00
S	0,20	0,06
Cr	0,10	0,10
Mn	1,00	1,00
Fe	96,00	96,00
Cu	0,90	0,80

3.1.2 Características mecânicas

As características mecânicas a avaliar nos varões são as seguintes, de acordo com a norma [18] :

- tensão de rotura, R_m ;
- tensão de cedência superior (ou, caso não exista, a tensão limite de proporcionalidade a 0.2%), R_{eH} ;
- relação entre os valores de tensão de rotura e da tensão de cedência (R_m / R_{eH});
- relação entre os valores da tensão de cedência obtidos em cada ensaio (em MPa) e o valor padrão da tensão de cedência ($R_{eH}/500$);
- extensão total na força máxima, A_{gt} ;
- aptidão à dobragem.

As características mecânicas dos varões devem satisfazer os valores característicos mínimos indicados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Características mecânicas [18]

R_e (MPa)	R_m / R_{eH}	R_m / R_{e4}	$R_{eH}/500$	A_{gt} (%)
500	1,15	1,35	1,20	8

Em relação à aptidão à dobragem, os varões devem suportar, tanto no ensaio de dobragem como no ensaio de dobragem-desdobragem, um ângulo de dobragem (γ) e um e ângulo de desdobragem (δ), sobre os respectivos valores de diâmetro de mandril referenciados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Diâmetros dos mandris e respectivos ângulos de dobração utilizados nos ensaios de dobração e de dobração-desdobração [18]

	Dobração simples	Dobração-desdobração			
Diâmetro nominal do varão ϕ [mm]	6; 8; 10; 12	14; 16	20; 25	32	40
Diâmetro do mandril D[mm]	3ϕ	6ϕ	8ϕ	10ϕ	12ϕ
Ângulo de dobração γ [°]	180	90 e ângulo de desdobração (δ) 20			

Os varões devem apresentar características de resistência relativamente à fadiga e a acções cíclicas, tal como se pode ver nas tabelas seguintes.

Tabela 3.7 - Condições do ensaio de fadiga [18]

Ensaio de fadiga	
Tensão máxima σ_{\max} [MPa]	300
Tensão mínima σ_{\min} [MPa]	150
Número de ciclos sem rotura	2×10^6

Tabela 3.8 - Condições do ensaio cíclico alternado [18]

Ensaio cíclico alternado	
Deformação máxima [%]	$\pm 2,5$
Frequência [Hz]	< 3
Número de ciclos sem rotura	10

3.2 Equipamento Experimental

3.2.1 Equipamento de soldadura

Utilizou-se um protótipo de equipamento de SRP existente na *Codimetal*, constituído por três tipos de componentes: o circuito eléctrico, o equipamento de controlo e o sistema mecânico.



Figura 3.2 - Protótipo de SRP

3.2.1.1 Circuito eléctrico

O circuito eléctrico é constituído por um conjunto de disjuntores, relés, fusíveis, uma fonte de alimentação e *hardware* de controlo, existentes no armário de comando (Figura 3.3). Conectado à fonte de alimentação passando por uma caixa de fusíveis, de modo a criar um sistema de segurança, situa-se o transformador, que por sua vez, está ligado ao circuito secundário, onde faz parte os eléctrodos, que ao se unirem com o material a efectuar soldadura, irá fechar o circuito eléctrico.

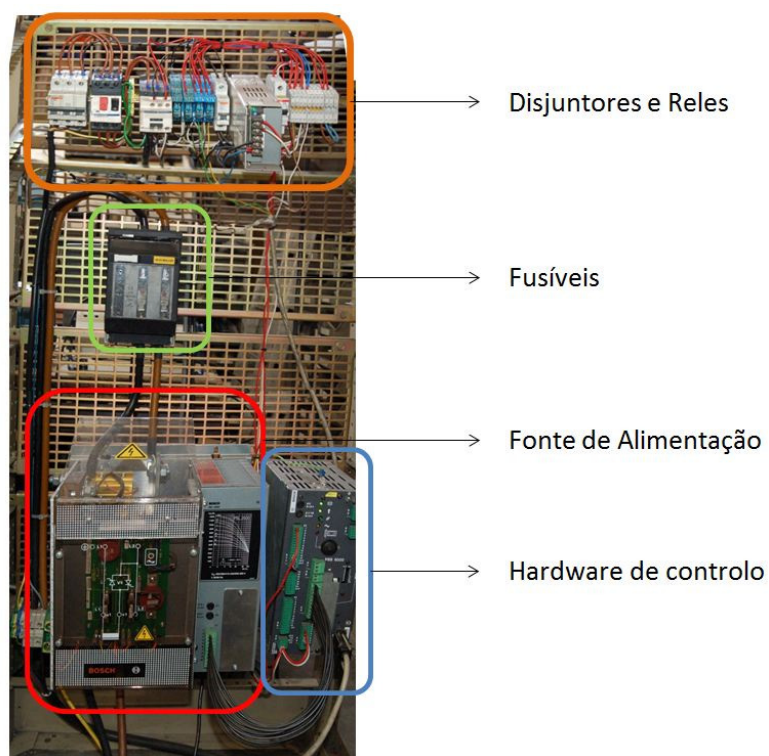


Figura 3.3 - Armário de comando

Os eléctrodos utilizados são de cobre com as dimensões especificadas na Figura 3.4 e têm como objectivo:

1. conduzir a corrente até às peças, com a mínima resistência;
2. transmitir a força de aperto gerada pelo êmbolo;
3. dissipar uma parcela do calor gerado;
4. manter o contacto entre as peças a efectuar soldadura, garantindo a força ao longo do processo e sem que estes sejam soldados juntamente com a peça.

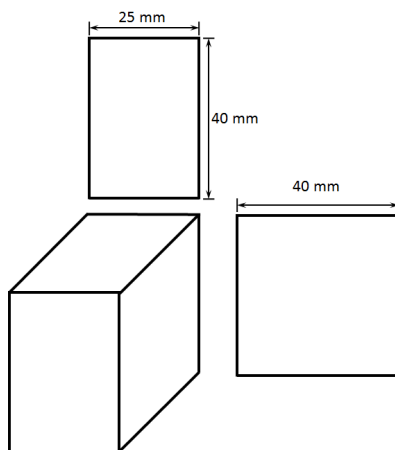


Figura 3.4 - Esquema eléctrodos

3.2.1.2 Sistema mecânico

O sistema mecânico é composto por duas partes, a parte estrutural e o macaco hidráulico.

A parte estrutural suporta o transformador, o circuito secundário, válvula de controlo e o macaco hidráulico (Figura 3.5), que por sua vez, está acoplado ao eléctrodo superior e tem como objectivo, efectuar o movimento descendente ou ascende do mesmo.

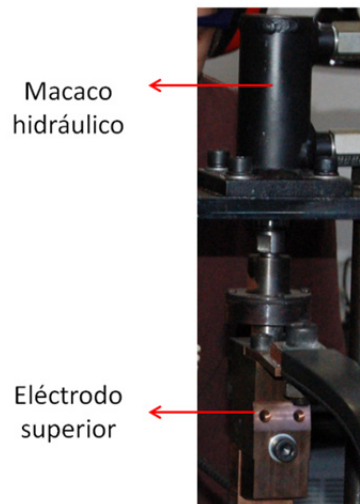


Figura 3.5 – Macaco hidráulico acoplado na estrutura

A bomba hidráulica de alta pressão tem uma capacidade máxima de 400 bar, é controlada por uma válvula de 5 vias, como se pode ver no esquema (Figura 3.6). Esta válvula controla o deslocamento do macaco hidráulico, regulando a pressão através de um parafuso de ajuste (Figura 3.6) e actua sob o comando de dois relés que são activados através do sistema de controlo. De notar que todo o sistema mecânico se encontra isolado do circuito eléctrico.

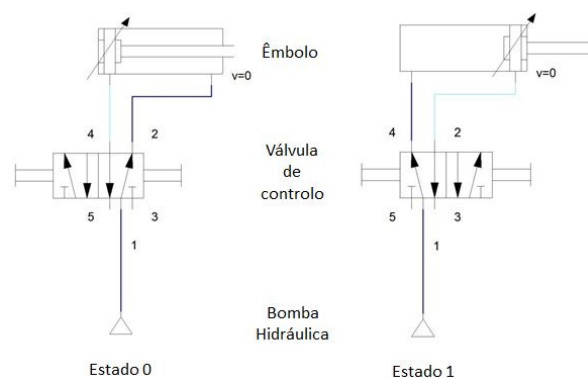


Figura 3.6 – Esquema do circuito hidráulico

3.2.2 Equipamento de controlo e aquisição de dados

O equipamento de soldadura por resistência foi devidamente instrumentado com sensores para medição e recolha digital dos respectivos sinais, designadamente a corrente, a tensão e a força de aperto.

O sensor utilizado para medir a força de aperto produzida pelo macaco hidráulico, encontra-se na parte inferior do equipamento estando convenientemente isolado a nível eléctrico. Este sensor consiste num anel de carga onde estão colados extensómetros, tal como se pode ver na Figura 3.7.

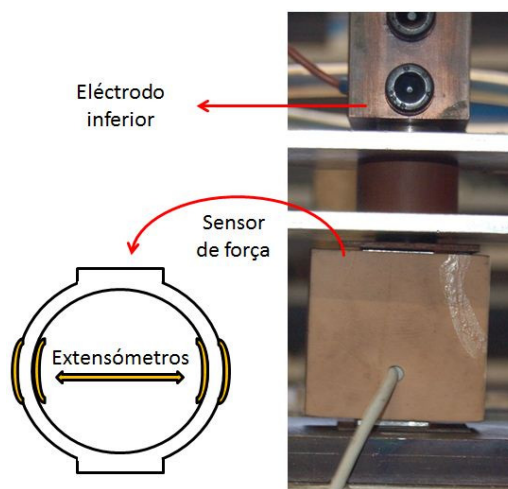


Figura 3.7 - Sensor de força

Para a medição da corrente utilizou-se uma bobine de *Rogowski* (Anexo A3) que converte a corrente medida numa tensão proporcional à corrente.

Os sinais produzidos por estes sensores são recolhidos digitalmente por um sistema de aquisição de dados da *National Instruments*, designado de *NI CompacDAQ*.

Para a recolha dos dados foi desenvolvido um programa em *LABVIEW 2010* cuja interface se mostra na Figura 3.8.



Figura 3.8 - Interface do programa de aquisição de dados e controlo de soldadura

Para além da aquisição, este programa também efectua o comando de todos os elementos que executam a soldadura, designadamente:

1. accionamento do macaco hidráulico;
2. controlo da válvula para o aperto/alívio dos eléctrodos;
3. envio de ordem de soldadura para o controlador *BOS-5000* e simultaneamente accionamento do disparo do osciloscópio (como se explica adiante);

O programa *BOS-5000* tem um interface gráfico (Figura 3.9) com a possibilidade de controlar diversas variáveis do processo. Destas, consideraram-se apenas o número de ciclos e a percentagem de calor.

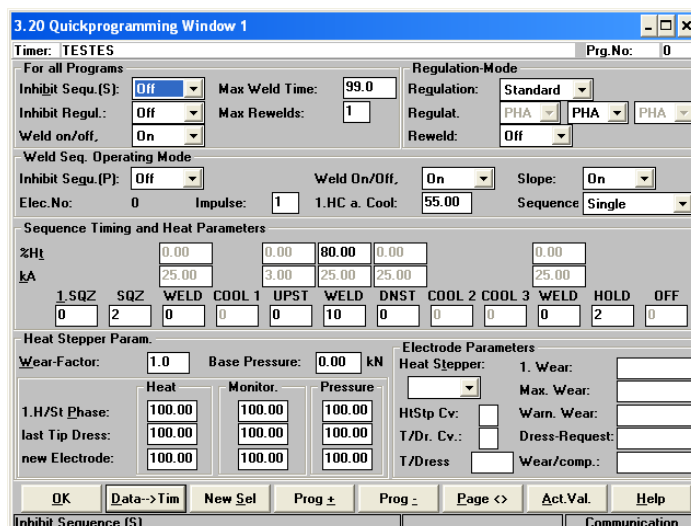


Figura 3.9 - Janela de configuração da soldadura do programa *BOS-5000*

O número de ciclos controla o tempo de soldadura e a percentagem de calor controla o valor da intensidade da corrente, ou seja, ao seleccionar a percentagem desejada, existe uma modulação da corrente de modo a diminuir o valor do *RMS*, na Figura 3.10 existem duas ondas com a

mesma frequência, uma delas (a vermelho) contém patamares bastantes próximos de zero, o que resulta num menor valor de RMS , uma vez que o período é o mesmo.

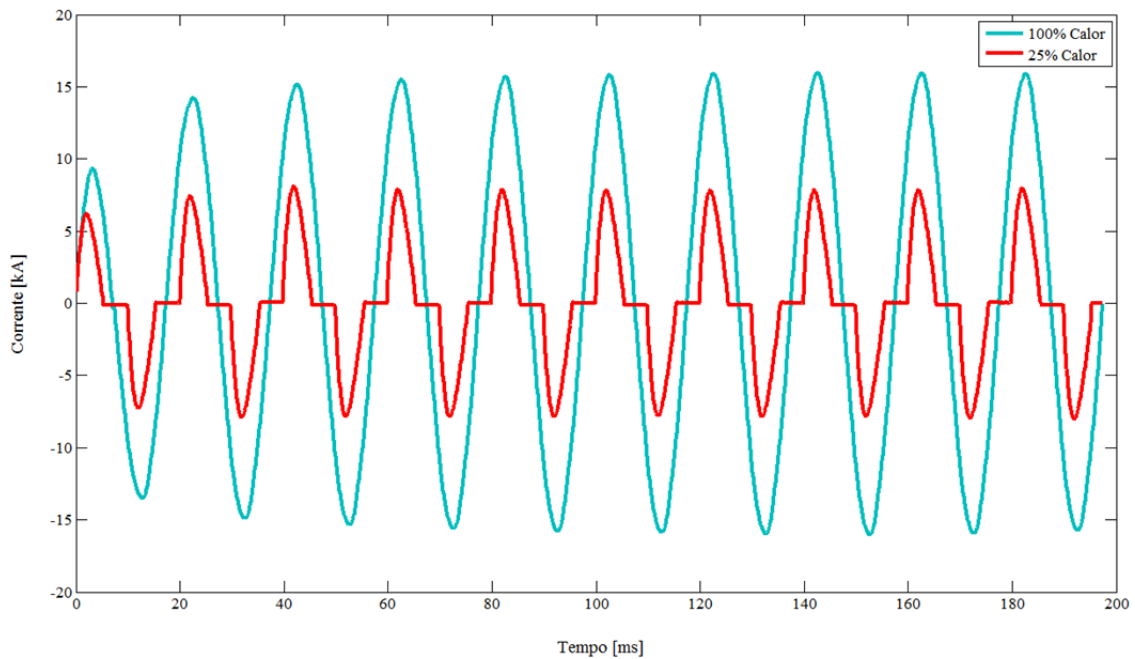


Figura 3.10 – Modulação da corrente através do *hardware* de controlo

Para medir a tensão foi utilizado um osciloscópio *Tektronix TPS2024* com um *software* de recolha de dados, designado *Open Choice Desktop*. A razão da utilização do osciloscópio deveu-se ao facto de evitar danos no sistema de aquisição de dados, uma vez que a soldadura teria correntes da ordem de 16 kA de pico, com tensões porventura excedendo a capacidade do sistema. O osciloscópio funcionou assim como interface de acoplamento.

Dado que o osciloscópio apenas adquire 2500 pontos, ajustou-se a frequência de aquisição de forma a compatibilizar os dois sistemas (Equação 3.2). Também se procedeu à sincronização do osciloscópio com o *trigger* enviado pelo sistema *NI CompacDAQ*.

$$Freq_{aquisição} = \frac{\text{Número de aquisições}}{\text{tempo}} \quad \text{Equação 3.2}$$

O ajuste calculado levou a definir-se uma janela de tempo em 250 ms, para comportar a duração de uma descarga. Deste modo garantiu-se a captação da onda completa, tal como apresenta a Figura 3.11.

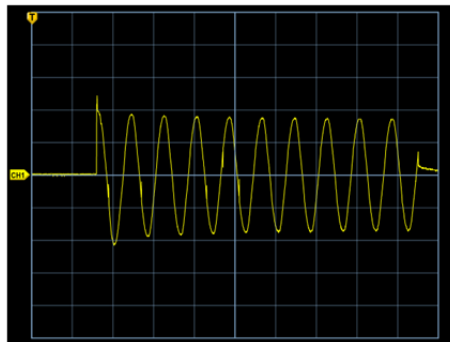


Figura 3.11 - Janela de captura do osciloscópio

3.2.3 *Software* de tratamento de dados

Os *softwares* utilizados para o tratamento de dados foram o *Matlab* e o *Statistica*. O primeiro foi utilizado para criar um programa que realiza a leitura dos ficheiros de texto com os dados correspondentes a cada sensor, tornando-os em valores de várias matrizes para posterior estudo do comportamento das respectivas variáveis. O segundo teve o propósito de efectuar o plano dos ensaios correspondente ao planeamento final (ver Cap.3.3), assim como, no final dos ensaios permitir a análise de variância (ANOVA) e assim obter modelos de resposta em função das variáveis de processo.

3.2.4 Equipamento de caracterização mecânica

Para a realização dos ensaios de caracterização mecânica utilizou-se uma máquina de ensaios de tracção com diversos tipos de programas e de funções, da marca *SERVOSIS* com capacidade de força máxima à tracção de 400 kN e também com capacidade de acoplar/desacoplar um extensómetro. Esta variedade de funções permitiu realizar os ensaios oligocíclicos e de tracção.

Para os ensaios de corte utilizou-se outra máquina de ensaios de tracção da marca *SHIMADZU* com capacidade de força máxima à tracção de 100 kN e de acoplar peças de suporte para ensaios específicos, tal como os de corte ou arranque de soldadura.

Relativamente ao ensaio de dobragem, este realizou-se num equipamento existente na *Codimetal* composto por um mandril, um ponto de apoio e ponto de força acoplado a uma alavanca, como se pode ver na Figura 3.12, seguindo o esquema já referido (Figura 3.18).

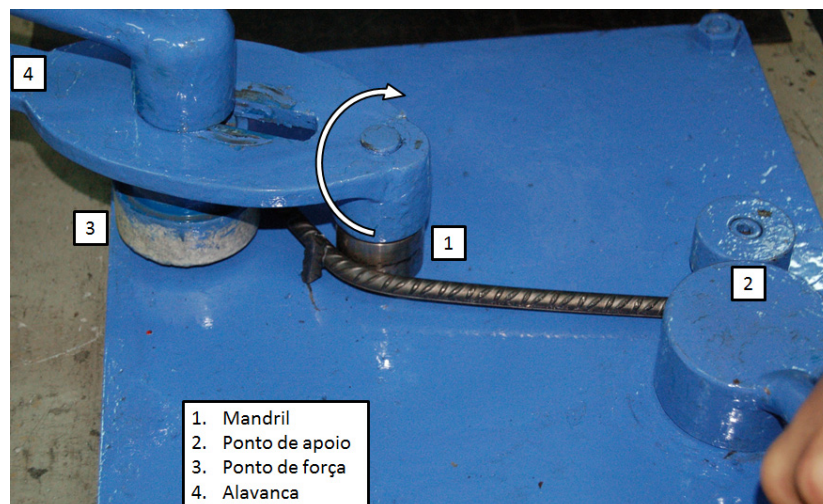


Figura 3.12 - Equipamento de dobragem manual

3.3 Planeamento

O planeamento de experiências tem como objectivo minimizar o número de experiências face ao estudo pretendido e estabelecer relações entre variáveis.

Por forma a conceber o planeamento, seleccionaram-se os factores que influenciam a resposta, tendo em conta todos os aspectos, tais como, nível de importância de parâmetros na soldadura por resistência, limitações no material fornecido e limitações de equipamento experimental, tanto a nível de aquisição, como de controlo.

Uma forma de fazer este planeamento, é utilizar a metodologia de resposta em superfície, que se pode definir como um conjunto de técnicas utilizadas no estudo empírico das relações entre uma ou mais respostas e o conjunto de variáveis de entrada [20], tendo como principais vantagens:

- fornecer uma distribuição razoável de uma gama de pontos em torno de uma região de interesse;
- fornecer uma estimativa de erro interno;
- fornecer estimativas precisas de coeficientes do modelo;
- fornecer uma previsão de variância em torno da região experimental;
- reduzir significativamente o número de experiências;
- garantir a simplicidade de cálculo de parâmetros do modelo. [21]

Inicialmente foi criado um planeamento, utilizando o *software STATISTICA*, através do modelo quadrático que utiliza um polinómio de segundo grau para representar matematicamente a função da superfície de resposta (Equação 3.3) [22].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_i^k \sum_{j>i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde x_i e x_j são as variáveis de controlo (representam os níveis de cada factor); β_0 , β_i , β_{ii} , β_{ij} , os coeficientes do polinómio (obtidos por regressão); k representa o número de factores considerados para a experiência; e ε o erro [20]. O número de coeficientes β ($n\beta$), pode ser calculado através da Equação 3.4 [22].

$$n\beta = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad \text{Equação 3.4}$$

A forma mais comum para ajuste deste modelo, é denominada por planeamento composto central circunscrito, que consiste num planeamento factorial 2^k (usado para ajustar modelos de primeira ordem), onde são adicionadas $2k$ experiências axiais e n_c as experiências centrais [21]. Deste modo, o número total de experiências é [22]:

$$N = n_F + 2k + n_C \quad \text{Equação 3.5}$$

- $n_F = 2^k$ são os pontos dum planeamento factorial completo, correspondentes aos vários vértices de um cubo k -dimensional $(x_1, x_2, \dots, x_k) = (\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1)$;
- $2k$ pontos correspondentes aos vértices de uma estrela k -dimensional, centrada no cubo anterior, designados por pontos estrela $(\pm\alpha, 0, \dots, 0), (0, \pm\alpha, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, \pm\alpha)$;
- $n_C \geq 1$ pontos centrais $(x_1, x_2, \dots, x_k) = (0, 0, \dots, 0)$.

O planeamento CCC (Composto Central Circunscrito), é um dos três tipos de planeamento composto central e foi utilizado no Planeamento 1, tendo em conta que explora um domínio mais alargado do espaço do planeamento e goza da propriedade *rotatable*¹, ou seja, fornece igual precisão de estimação em todas as direcções através da escolha de uma distância (α) do centro a um dos pontos estrela, em que $|\alpha| \geq 1$ [21].

$$\alpha = \sqrt[k]{n_F} \quad \text{Equação 3.6}$$

Este tipo de planeamento possui uma simetria circular, esférica ou hiper esférica e requer cinco níveis para cada factor. A Figura 3.13 mostra a estrutura de CCC para $k=2$ e $k=3$.

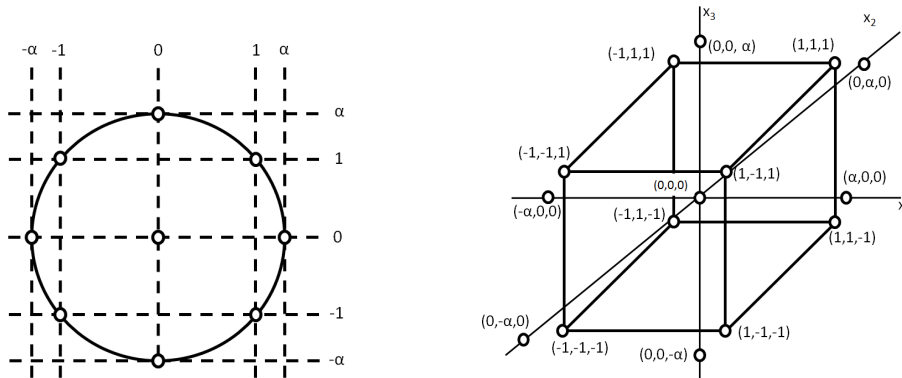


Figura 3.13 – Composto Centrado Circunscrito para $k = 2$ e $k = 3$ [21]

¹ Utilizou-se a nomenclatura inglesa por não se ter conseguido encontrar uma designação portuguesa para este termo.

A Tabela 3.9 mostra o Planeamento 1 inicialmente previsto, mas devido à inexistência de varões com diâmetros superiores a 10 mm e à capacidade máxima do protótipo gerar correntes superiores a 16 kA de pico (valores a vermelho na Tabela 3.9), este foi considerado inviável.

Tabela 3.9 - Planeamento 1 – CCC com 5 níveis e 4 variáveis

Planeamento 1					
Variáveis	Níveis				
	-2	-1	0	1	2
Diâmetro [mm]	6	8	10	12	14
Corrente [kA]	20	25	30	35	40
Tempo [ms]	80	120	160	200	240
Força [kN]	3	4	5	6	7

Com base nas limitações acima referidas, realizou-se um novo planeamento de forma a considerar apenas os diâmetros de varão disponíveis. No segundo planeamento, recorreu-se ao método factorial fraccionado 3^{k-p} , em tudo igual ao 3^k , excepto que o número de experiências é reduzido a uma fracção $\frac{1}{3^p}$ do factorial completo [21]. Este modelo é bastante semelhante ao 2^k , com a diferença de que neste se usam apenas três níveis.

Tabela 3.10 - Planeamento 2 - 3^{k-p} com 3 níveis e 4 variáveis

Planeamento 2			
Variáveis	Níveis		
	-1	0	1
Diâmetro [mm]	6	8	10
Corrente [% calor]	40	70	100
Tempo [ciclos]	6	8	10
Força [bar]	70	110	150

No caso do Planeamento 2, a limitação foi a capacidade do equipamento experimental (16 kA de pico) que após a realização de ensaios mecânicos no varão de 10 mm, se verificou que os valores de força de corte de soldadura se encontravam abaixo do mínimo exigido pela especificação (ANEXO A1).

Assim, e dadas as limitações apresentadas, o estudo efectuado foi baseado exclusivamente nos varões de diâmetros de 6 mm e de 8 mm. Por consequência, foi definido um Planeamento Final, que consiste em dois planeamentos CCC, que embora idênticos, em termos de estrutura e de factores, são independentes, ou seja foi feito um planeamento para cada diâmetro.

De forma a facilitar a parametrização do controlador (Figura 3.9), foram usados os parâmetros (% calor, nº ciclos, pressão) para representar, respectivamente, a corrente [kA], o tempo [ms] e a força de aperto [kN].

Tabela 3.11 - Planeamento Final – 2 CCC com 5 níveis e 3 variáveis

Planeamento Final										
Diâmetro	6 mm					8 mm				
Variáveis	Níveis					Níveis				
	-1,6818	-1	0	1	1,6818	-1,6818	-1	0	1	1,6818
Corrente [%calor]	40	45	50	55	60	70	75	80	85	90
Tempo [ciclos]	4	5	6	7	8	6	7	8	9	10
Força [bar]	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80

Os valores deste planeamento foram encontrados através de uma série de experiências e ensaios realizados, varrendo um intervalo de valores de variáveis de processo, de modo a obter o valor para o nível central, sendo assegurado o estudo segundo os valores mais próximos do ponto óptimo de soldadura, relativamente aos valores de arranque de soldadura (Anexos A2 e A3).

Posteriormente, utilizou-se o *software STATISTICA* de forma a gerar o plano de ensaios. Este plano de ensaios é definido mantendo uma ordem aleatória de ensaios, sendo que, neste caso, foram efectuados 57, dos quais dois terços são réplicas. De notar, que neste planeamento existem mais ensaios, onde os parâmetros se situam nos níveis mais próximos do ponto central.

Cada ensaio implicou seis soldaduras, para cinco tipos de provetes, como é explicado no capítulo seguinte.

3.4 Métodos Experimentais

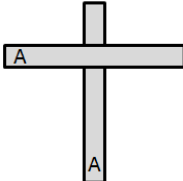
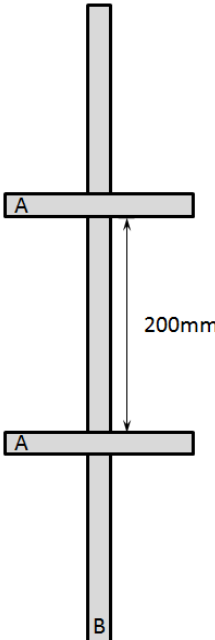
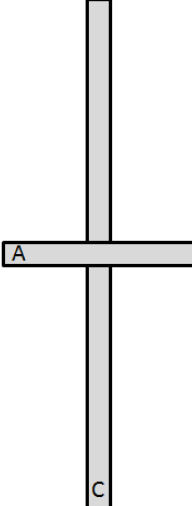
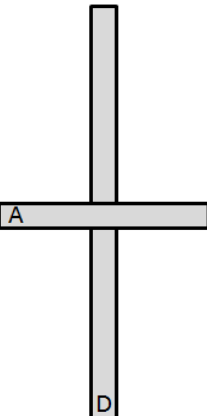
3.4.1 Elaboração de provetes

Os provetes para os ensaios referidos foram extraídos por corte dos varões de aço em quatro dimensões diferentes (Tabela 3.12). Na Tabela 3.13 mostra-se quatro tipos diferentes de provetes, um para cada tipo de ensaio mecânico.

Tabela 3.12 - Tipos de dimensões para a realização de provetes

Tipo	A	B	C	D
Dimensão [mm]	150	700	600	500

Tabela 3.13 - Tipos de provetes

Tipo de provete	1	2	3	4
Esquema				
Ensaio mecânico	Força de corte de soldadura	Tracção	Oligocíclico	Dobragem

Posteriormente, efectuaram-se as soldaduras com as variáveis correspondentes ao plano de ensaios definido aleatoriamente através do *software STATISTICA* (Tabela 3.14) e onde, para cada ensaio, foi necessário realizar oito soldaduras para obter estes tipos de provetes, sendo que

o provete para o ensaio de corte de soldadura foi sempre duplicado, por forma a obter resultados mais representativos.

Tabela 3.14 - Plano de ensaios definido aleatório através do *software STATISTICA*

6 mm			Diâmetro de varão	8 mm		
Corrente [%calor]	Tempo [ciclos]	Força [bar]	Ordem ensaios	Corrente [%calor]	Tempo [ciclos]	Força [bar]
45	7	50	1	75	9	75
50	6	45	2	80	8	70
50	6	55	3	80	8	80
45	5	40	4	75	7	65
50	6	45	5	80	8	70
50	6	55	6	80	8	80
45	5	40	7	75	7	65
50	6	35	8	80	8	60
50	6	45	9	80	8	70
55	7	50	10	85	9	75
50	6	35	11	80	8	60
50	6	45	12	80	8	70
50	6	55	13	80	8	80
55	5	40	14	85	7	65
50	4	45	15	80	6	70
40	6	45	16	70	8	70
50	6	45	17	80	8	70
45	7	40	18	75	9	65
55	5	50	19	85	7	75
50	6	45	20	80	8	70
50	6	45	21	80	8	70
50	4	45	22	80	6	70
45	5	40	23	75	7	65
60	6	45	24	90	8	70
50	6	45	25	80	8	70
55	7	50	26	85	9	75
40	6	45	27	70	8	70
45	5	50	28	75	7	75
55	7	40	29	85	9	65
40	6	45	30	70	8	70
55	7	40	31	85	9	65
55	5	40	32	85	7	65
60	6	45	33	90	8	70
45	7	50	34	75	9	75
55	5	50	35	85	7	75
50	6	45	36	80	8	70
50	8	45	37	80	10	70
60	6	45	38	90	8	70
55	5	40	39	85	7	65
45	7	40	40	75	9	65
45	7	50	41	75	9	75
50	6	45	42	80	8	70
45	7	40	43	75	9	65
50	6	45	44	80	8	70
50	6	45	45	80	8	70
55	7	40	46	85	9	65
45	5	50	47	75	7	75
50	8	45	48	80	10	70
55	7	50	49	85	9	75
50	6	35	50	80	8	60
50	6	45	51	80	8	70
45	5	50	52	75	7	75
50	6	45	53	80	8	70
50	6	45	54	80	8	70
50	8	45	55	80	10	70
50	4	45	56	80	6	70
55	5	50	57	85	7	75

3.4.2 Ensaio de tracção

O procedimento de execução do ensaio de tracção é bastante simples, uma vez que o provete já contém as medidas correctas para a sua colocação na máquina de ensaios de tracção. Como se pode ver na Figura 3.14 o provete é preso nas suas extremidades através de garras, e as pinças do extensómetro encontram-se presas ao provete numa zona próxima dos pontos de soldadura. Depois de colocado o provete, aplica-se uma força de tracção até a rotura do provete.

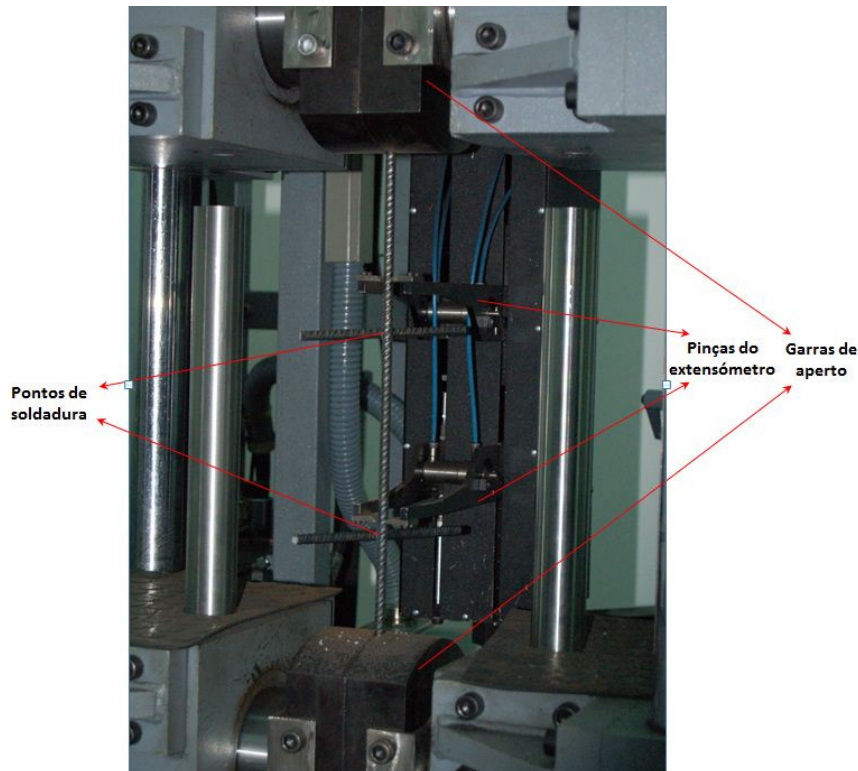


Figura 3.14 - Provete tipo 2 colocado na máquina de ensaios de tracção

O resultado deste ensaio é um diagrama tensão-extensão, onde o programa de controlo e aquisição calcula as características mecânicas provenientes do próprio diagrama, sendo as relevantes para este estudo, a tensão de cedência, a relação entre tensão de cedência e de rotura e também a percentagem de alongamento (A_{gt}), todas mencionadas na norma relativa às redes electrossoldadas. Estes resultados são obtidos como mostra a Figura 3.15.

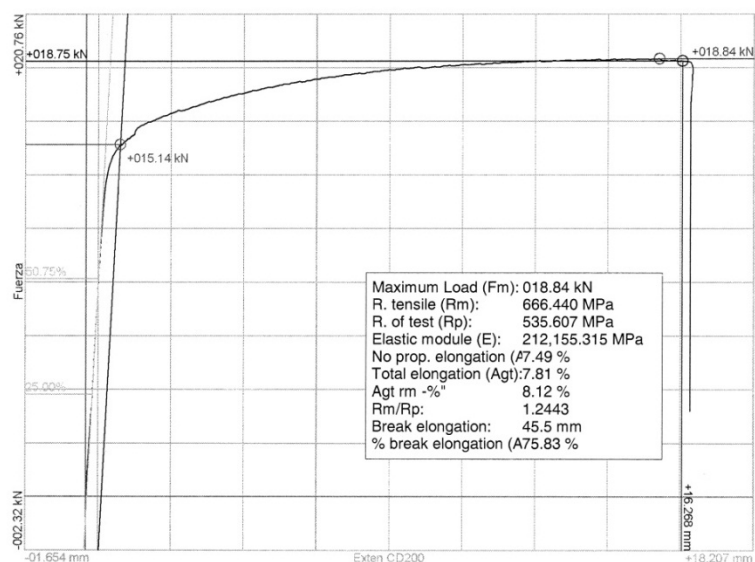


Figura 3.15 - Resultado do ensaio de tracção

3.4.3 Ensaio de corte ou arranque de soldadura

O ensaio de corte de soldadura ou arranque de soldadura é realizado de forma a criar forças de corte na zona soldada. No caso específico de varões electrossoldados são aplicadas forças de tracção (zonas a vermelho), uma em cada varão, criando uma zona de forças de corte no ponto de soldadura (zona a verde) [19], tal como descreve a Figura 3.16.

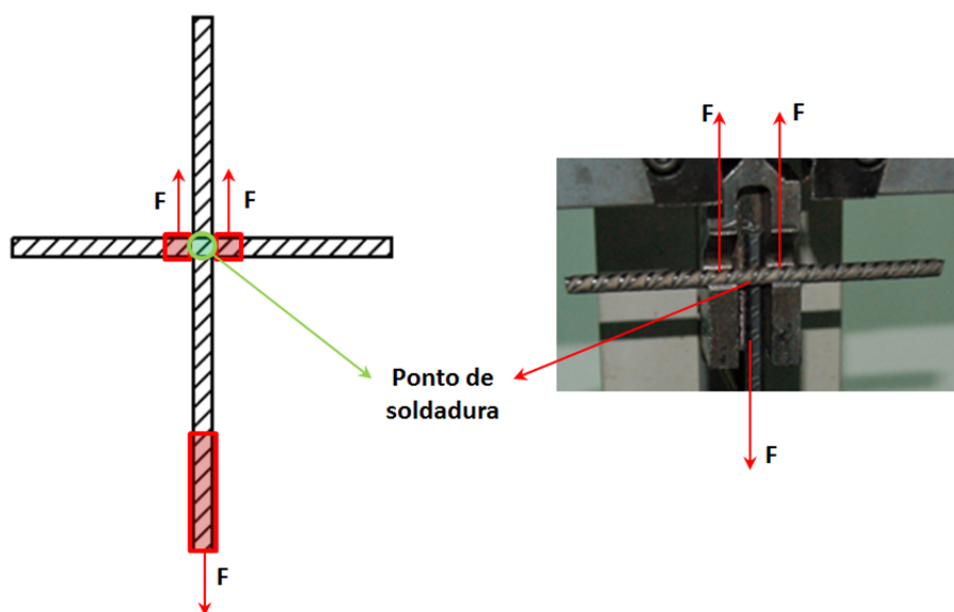


Figura 3.16 - Esquema de aplicação das forças de tracção de modo a criar forças de corte no ponto de soldadura [19]

Este tipo de ensaio é bastante rápido de realizar, devido à sua preparação, uma vez que requer uma máquina de ensaios de tracção e um suporte específico (Figura 3.17). O modo de execução é bastante simples: primeiro prende-se o suporte específico na garra superior, segundo encaixa-se o provete na posição demonstrada, terceiro prende-se a extremidade solta do provete com a outra garra e finalmente, aplica-se uma força de tracção até partir a soldadura ou o provete. O resultado obtido é a força máxima aplicada, que geralmente ocorre no ponto de rotura do provete, a não ser que exista escorregamento na garra, o que torna o ensaio nulo.

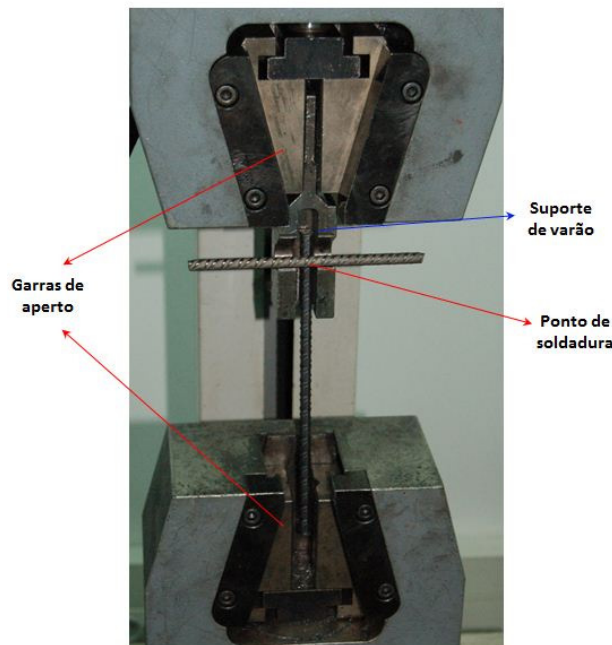


Figura 3.17 - Provedor tipo 1 colocado no equipamento para ensaio de arranque de soldadura

3.4.4 Ensaio de dobragem

O ensaio de dobragem consiste em dobrar o provete com um determinado raio e com um ângulo determinado. Usualmente, a geometria do provete tem uma secção transversal uniforme, como por exemplo, vigas ou varões. Este ensaio pode consistir numa dobragem em três pontos, onde a dobra resultante é sobre um ponto (Figura 3.18) [19].

Este ensaio tem como resultado a rejeição ou aprovação. No entanto só é considerado aprovado quando não ocorram fendas visíveis a olho nu. No caso de ocorrerem fendas, estas podem ter uma profundidade inferior à sua largura (fendas superficiais) [19].

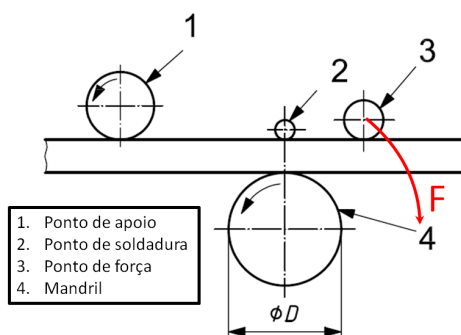


Figura 3.18 - Esquema de dobragem a três pontos [19]

Este ensaio foi realizado manualmente, recorrendo ao equipamento acima mencionado. Foi dobrado um provete do tipo 4, a 180° sobre um diâmetro três vezes superior ao diâmetro do varão, tal como especificado na Tabela 3.15. Para a realização deste ensaio foi necessário cortar o varão de dimensão A, depois de efectuada a soldadura, de modo a que este igualasse a altura do mandril e permitisse a passagem da alavanca por cima do mesmo. A Figura 3.19 mostra o processo de dobragem.

Tabela 3.15 - Correspondência de diâmetro de varão com o de mandril

Provete	Diâmetro [mm]	
	6	8
Mandril	18	24

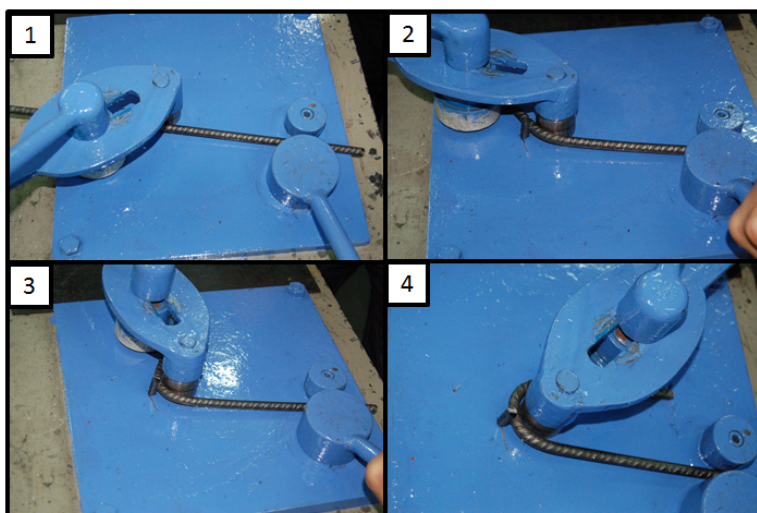


Figura 3.19 - Esquema ilustrativo dos diferentes estados do processo de dobragem

3.4.5 Ensaio oligocíclico

Este ensaio é em tudo igual ao ensaio de fadiga, mas em vez de se aplicar uma variação de força, de modo a provocar uma gama de tensões, aplica-se uma deformação cíclica de tracção – compressão, com um número de ciclos menor.

A sua montagem é igual à montagem para o ensaio de tracção, diferenciando no tipo de provete e na inexistência do extensómetro. O resultado é acompanhado por um diagrama de ciclos, onde se mostra o número de ciclos efectuados assim como a extensão e a respectiva força de cada ciclo. Deste ensaio registou-se a aprovação ou rejeição do provete, consoante a rotura do mesmo. A Figura 3.20 mostra o provete do tipo 3 já pronto para a realização do ensaio, sendo o seu resultado apresentado na Figura 3.21.

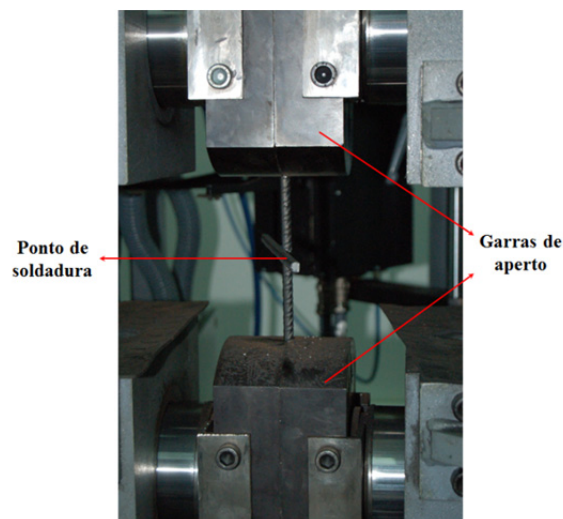


Figura 3.20 - Provete tipo 3 colocado na máquina de ensaios de tracção para o ensaio oligocíclico

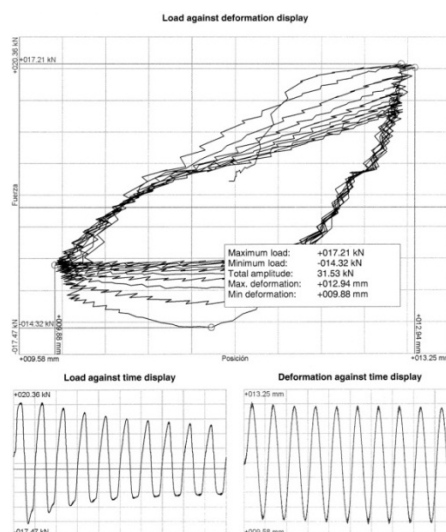


Figura 3.21 - Resultado impresso do ensaio oligocíclico

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaios

Nas tabelas seguintes (Tabela 4.1 e Tabela 4.2) registaram-se os resultados dos ensaios mecânicos, para os diâmetros de 6 e de 8 mm, respectivamente. Estas tabelas revelam os valores dos dois ensaios de corte de soldadura (F_{corte}), a tensão de cedência (R_e), o coeficiente entre a tensão de rotura e de cedência (R_m / R_{eH}), a percentagem do alongamento total (A_{gt}), assim como a aprovação no ensaio de dobragem e oligocíclico, para ambos os diâmetros. Os resultados a vermelho indicam que os valores se encontram fora dos limites aceites pela norma. As tabelas de resultados estão acompanhadas das características de aprovação, segundo a norma do *LNEC* (Tabela 4.3e Tabela 4.4).

Tabela 4.1 – Resultados de todos os ensaios efectuado e a correspondente aprovação para varão de 6 mm

Ordem ensaios	$F_{\text{corte I}}$ [N]	$F_{\text{corte II}}$ [N]	Tracção			Oligocíclico	Dobragem
			R_e [MPa]	R_m/R_{eH}	A_{gt} [%]		
1	3500	4920	527,986	1,3015	9,8	S	N
2	15780	7300	531,373	1,2805	8,2	S	S
3	5500	5560	527,986	1,2975	9,6	S	S
4	9920	7520	523,752	1,3007	9,0	S	S
5	8940	11760	525,869	1,2794	5,0	S	S
6	9640	9640	523,752	1,2926	10,4	S	S
7	11660	8160	530,526	1,2698	6,9	S	N
8	8140	9620	531,797	1,2707	7,4	S	S
9	9560	15440	518,671	1,2808	8,3	S	S
10	11940	12280	535,607	1,2798	10,4	S	S
11	9420	14500	519,095	1,3108	7,1	S	S
12	13540	15260	523,644	1,2703	6,7	S	S
13	7660	9400	518,248	1,3080	10,2	S	N
14	11660	13020	533,49	1,2841	9,5	S	N
15	12300	11000	537,724	1,2693	6,5	S	S
16	8540	5800	532,220	1,2944	9,7	S	N
17	15280	14860	529,256	1,2712	8,9	S	S
18	5680	14640	527,563	1,2753	9,7	S	S
19	14960	9080	536,554	1,2755	6,3	S	S
20	5280	7400	530,526	1,2761	8,7	S	S
21	7020	10020	538,148	1,2549	6,5	S	S
22	8600	11000	530,103	1,2843	8,3	S	S
23	10720	8900	531,373	1,2873	7,1	S	S
24	16560	9380	538,571	1,2712	7,8	S	S
25	13420	11880	525,022	1,2726	7,8	S	S
26	9620	17760	533,067	1,2772	7,1	S	N
27	13340	5140	525,869	1,3052	8,7	S	S
28	7720	5000	536,454	1,2786	6,9	S	N
29	16760	15940	530,103	1,2923	9,1	S	S
30	5520	5120	532,220	1,3063	8,0	S	N
31	20140	11560	523,752	1,3298	8,2	S	S
32	17460	10700	521,212	1,2965	8,9	S	S
33	13280	15100	547,039	1,2763	6,5	S	S

Ordem ensaios	F _{corte I} [N]	F _{corte II} [N]	Tracção			Oligocíclico	Dobragem
			R _e [MPa]	R _m /R _{eH}	A _{gt} [%]		
34	12300	4700	539,418	1,2991	8,2	S	S
35	4060	4440	546,616	1,2851	9,4	S	S
36	4740	6440	537,301	1,2916	6,5	S	S
37	9140	14200	511,473	1,3328	8,0	S	S
38	17660	14180	541,112	1,2887	6,5	S	S
39	14260	12860	558,895	1,2788	8,2	S	S
40	6540	5680	523,329	1,3196	6,5	S	S
41	11500	7240	543,652	1,2835	5,7	S	S
42	14360	5680	566,093	1,2700	6,7	S	S
43	8740	8400	552,977	1,3002	7,9	S	S
44	8300	11600	558,048	1,2769	6,6	S	S
45	9080	19380	543,652	1,3178	9,2	S	S
46	20300	17980	544,075	1,2903	8,1	S	S
47	3960	7460	550,427	1,2992	9,0	S	S
48	20060	7360	579,641	1,2396	7,3	S	S
49	20680	13020	538,571	1,3129	8,0	S	N
50	14900	16100	558,048	1,2800	7,9	S	S
51	6060	7840	544,075	1,3074	9,0	S	S
52	7680	5040	556,778	1,289	8,2	S	S
53	8220	5560	566,093	1,2700	6,6	S	S
54	6460	9860	552,12	1,2906	9,0	S	S
55	5400	20780	570,75	1,2567	5,8	S	S
56	6360	4780	516,131	1,3355	9,0	S	S
57	4980	7320	539,418	1,3163	8,3	S	S

Tabela 4.2 - Resultados de todos os ensaios efectuado e a correspondente aprovação para varão de 8 mm

Ordem ensaios	F _{corte I} [N]	F _{corte II} [N]	Tracção			Oligocíclico	Dobragem
			R _e [MPa]	R _m /R _{eH}	A _{gt} [%]		
1	18980	12940	538,015	1,1881	11,9	S	N
2	14260	13240	543,255	1,1990	12,5	S	S
3	17740	13840	544,208	1,1930	10,3	S	N
4	8140	17660	538,730	1,2065	11,5	S	S
5	14700	15560	549,686	1,1854	10,4	S	N
6	16320	10960	548,495	1,1828	11,7	S	N
7	15360	16200	546,113	1,1915	11,4	S	N
8	13440	17600	546,113	1,1897	12,5	S	N
9	15020	12260	552,067	1,1829	10,9	S	S
10	20020	17100	548,257	1,1838	10,8	S	S
11	14540	13040	548,971	1,1826	11,5	S	S
12	11120	14920	543,017	1,1987	12,3	S	S
13	12180	15880	543,170	1,1956	10,0	S	S
14	11640	18340	535,634	1,2063	10,8	S	S
15	10100	15080	535,157	1,2118	10,3	S	S
16	13540	12400	523,726	1,2119	12,1	S	S
17	12540	21660	546,351	1,1918	12,5	S	S
18	25280	15420	550,162	1,1883	10,3	S	S
19	22220	12360	545,875	1,1907	10,6	S	N
20	11540	16020	544,446	1,1938	12,1	S	S
21	14780	14560	546,351	1,1918	12,3	S	S
22	8660	11120	534,205	1,1939	11,7	S	S
23	16200	9180	543,255	1,1911	11,1	S	S
24	21220	14000	535,396	1,1899	11,1	S	S
25	18060	19700	533,49	1,1978	12,9	S	N
26	21760	14380	535,872	1,1889	11,5	S	S
27	11540	13440	534,205	1,1971	10,6	S	S
28	13720	12060	547,542	1,1888	12,3	S	S
29	17600	26000	538,730	1,2065	10,6	S	S
30	9480	13560	531,347	1,2080	13,0	S	S
31	24800	20960	535,396	1,2028	11,8	S	S
32	22200	21440	537,539	1,1985	10,9	S	S

Ordem ensaios	F _{corte I} [N]	F _{corte II} [N]	Tracção			Oligocíclico	Dobragem
			R _e [MPa]	R _m /R _{eH}	A _{gt} [%]		
33	23920	16540	537,777	1,2019	12,6	S	S
34	10460	13560	530,394	1,2057	11,7	S	N
35	12840	11480	557,783	1,1879	12,9	S	N
36	17440	11600	538,254	1,2035	11,7	S	S
37	23880	22640	535,634	1,201	10,6	S	N
38	17460	18100	519,915	1,2158	10,6	S	S
39	18200	14920	521,344	1,2289	11,2	S	S
40	21140	17000	536,348	1,2118	12,7	S	S
41	20580	14482	536,110	1,2141	13,1	S	S
42	14140	15680	517,771	1,2098	12,3	S	S
43	18540	21380	550,638	1,1938	10,5	S	N
44	13880	14780	540,873	1,1977	10,6	S	S
45	18240	20980	543,731	1,2002	12,2	S	S
46	17320	23720	542,302	1,1796	10,1	S	N
47	17460	9140	554,925	1,1893	11,8	S	S
48	16240	23800	545,875	1,2007	12,2	S	S
49	22520	16400	539,683	1,2079	12,2	S	N
50	22920	17460	560,165	1,1786	12,3	S	S
51	13980	14100	531,347	1,2143	10,6	S	S
52	13800	21220	550,162	1,1905	12,2	S	N
53	15980	16440	540,397	1,2054	11,4	S	S
54	17200	15020	528,013	1,2264	11,5	S	N
55	14060	19040	534,919	1,2195	10,6	S	S
56	9000	10160	549,209	1,1943	12,9	S	N
57	20440	11920	547,304	1,2010	12,0	S	N

Tabela 4.3 - Limites de características mecânicas de aprovação referente à norma LNEC, para varão de 6 mm

6 mm	Valores Mínimos	Valores Máximos
F _{corte} [N]	4245	
R _e [MPa]	500	
R _m /R _{eH}	1,15	1,35
A _{gt} [%]	8	

Tabela 4.4 - Limites de características mecânicas de aprovação referente à norma LNEC, para varão de 8 mm

8 mm	Valores Mínimos	Valores Máximos
F _{corte} [N]	7545	
R _e [MPa]	500	
R _m /R _{eH}	1,15	1,35
A _{gt} [%]	8	

4.2 Características mecânicas do material

A influência dos parâmetros de soldadura, relativamente às características mecânicas do varão é baixa. Nas tabelas acima mencionadas, a tensão de cedência (R_{eH}) e o coeficiente entre a tensão de rotura e de cedência (R_m / R_{eH}) estão de acordo com as normas em vigor mesmo depois da soldadura. Estas características são intrínsecas ao material e como se pode ver, através da Tabela 4.5 (varão de 6 mm), dependem bastante do estado de fornecimento do material.

Efectuou-se uma série de ensaios de tracção, segundo a norma *ISO 15630-1 2010 – Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – test methods- Part1: Reinforcing bars, wire rod and wire* [23], apenas com o varão no seu estado de fornecimento, obtendo-se assim as seguintes tabelas (Tabela 4.5 e Tabela 4.6).

Tabela 4.5 - Média e desvio padrão das características mecânicas provenientes dos provetes de 6 mm e respectivas taxas de aprovação

6 mm	R_e [MPa]		R_m / R_{eH}		A_{gt} [%]	
	Varão Simples	Varão Soldado	Varão Simples	Varão Soldado	Varão Simples	Varão Soldado
Média	527,9	537,1	1,273	1,289	8,32	7,97
Desvio Padrão	21,9	14,5	0,045	0,019	1,49	1,27
Mínimo	506,4	511,5	1,097	1,239	4,76	5,01
Máximo	617,3	579,6	1,333	1,336	11,70	10,37
Aprovação [%]	100%	100%	95%	100%	65%	54%

O alongamento total (A_{gt}) mostra uma percentagem de aprovação baixa para os varões de 6 mm soldados, sendo que apenas 54% estão de acordo com a norma. No caso do varão simples, a percentagem de aprovação foi de 65% e o valor mínimo do A_{gt} alcançou um valor inferior ao do varão soldado.

Em relação aos provetes de 8 mm, estas características mecânicas mantiveram-se dentro dos intervalos da norma, como se pode confirmar na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Média e desvio padrão das características mecânicas provenientes dos provetes de 8 mm

8 mm	R_e [MPa]		R_m / R_{eH}		A_{gt} [%]	
	Varão Simples	Varão Soldado	Varão Simples	Varão Soldado	Varão Simples	Varão Soldado
Média	542,9	540,6	1,196	1,198	11,49	11,55
Desvio Padrão	5,6	8,9	0,009	0,011	0,74	0,87
Mínimo	534,2	517,8	1,183	1,179	10,28	10,00
Máximo	550,2	560,2	1,208	1,229	12,57	13,05
Aprovação [%]	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Os resultados referentes ao ensaio oligocíclico demonstram que todos os provetes de ambos os diâmetros estão de acordo com a norma. Para o ensaio de dobragem, não existiu esta coerência em ambos os diâmetros, que revelaram taxas de aprovação baixas como se mostra na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Taxa de aprovação do ensaio de dobragem para ambos os diâmetros de provetes

	6 mm	8 mm
Taxa de aprovação do ensaio de dobragem	84%	68%

Relativamente à ductilidade do material, esta característica pode ser descrita através do alongamento total (A_{gt}) e dos resultados do ensaio de dobragem. No caso do varão de 6 mm (Tabela 4.5) existe uma diminuição da percentagem de aprovados de 11% no A_{gt} e 16% nos ensaios de dobragem, enquanto no varão de 8 mm (Tabela 4.7) existe apenas um decréscimo de aprovação de 32% nos ensaios de dobragem.

De forma a esclarecer este efeito, realizaram-se perfis de microdurezas *Vickers*, através do microdurómetro da *MITUTOYO* sob uma carga de 3 N, aos varões simples e soldados. A Figura 4.1 mostra a dureza média, medida na secção transversal dos varões, percorrendo da extremidade do varão até ao ponto de estabilização da dureza (zona do núcleo do varão). Existe um aumento de dureza na zona soldada, o que se reflecte na diminuição da ductilidade localmente.

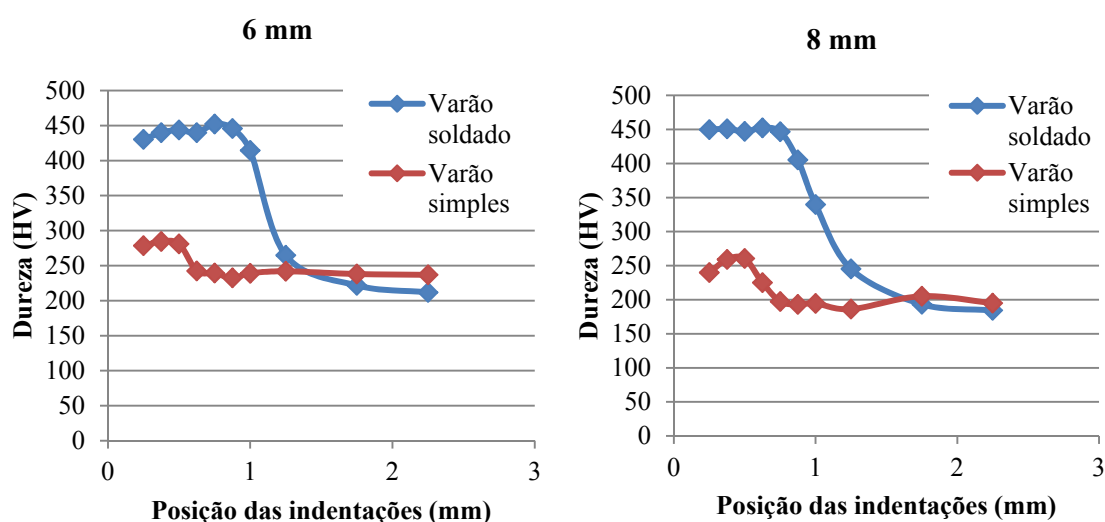


Figura 4.1 - Durezas dos varões de 6 mm e 8 mm

4.3 Características da soldadura: força de corte de soldadura

Como se pode verificar da Tabela 4.1, relativa ao varão de 6 mm, existe uma grande discrepância entre os resultados de força de corte de soldadura, realizados exactamente com os mesmos parâmetros de soldadura. Apesar de grande parte dos resultados se encontrarem acima do valor mínimo, existem três que não cumprem os valores da norma. Na tabela seguinte mostram-se estes casos particulares, de modo a realçar os parâmetros de soldadura, assim como a discrepância entre os resultados da força de corte.

Tabela 4.8 - Discrepância de valores de forças de corte de soldaduras para varão de 6 mm

6 mm							
Ordem ensaios	Ensaio	Original/Réplica	Corrente (%calor)	Tempo (ciclos)	Força (bar)	Corte I [N]	Corte II [N]
52	2	Original	45	5	50	7680	5040
28	21	Réplica1				7720	5000
47	40	Réplica2				3960	7460
41	4	Original	45	7	50	11500	7240
1	23	Réplica1				3500	4920
34	42	Réplica2				12300	4700
57	6	Original	55	5	50	4980	7320
19	25	Réplica1				14960	9080
35	44	Réplica2				4060	4440

A diferença mostrada na Tabela 4.8 pode ser justificada tendo em conta:

- Variações significativas no estado inicial das superfícies do material;
- O facto de o equipamento ser um protótipo e poder limitar a repetibilidade;
- A variabilidade intrínseca do material;
- A área de contacto entre os dois varões não ser constante, por serem de secção circular e nervurada (Figura 3.1).

4.3.1 Tabelas ANOVA

De forma a analisar os factores que influenciam a soldadura, recorreu-se aos resultados dos ensaios de força de corte de soldadura e ao *software STATISTICA*. As tabelas seguintes apresentam a influência de todas as variáveis consideradas neste trabalho, com o auxílio de tabelas *ANOVA* (Tabela 4.9 e Tabela 4.11) e de efeito (Tabela 4.10 e Tabela 4.12) para ambos os diâmetros.

Os parâmetros mais influentes (com intervalo de confiança de 95%) foram identificados através da tabela ANOVA (valores a vermelho) e posteriormente através da tabela de efeito foram encontrados os valores dos respectivos coeficientes (valores a negrito).

Tabela 4.9 - Tabela ANOVA referente aos factores influente na força de corte de soldadura para varão de 6 mm (STATISTICA)

ANOVA; Var.:Fcorte; R-sqr=,61618; Adj.,54269 (6 mm.sta) 3 factors, 1 Blocks, 57 Runs; MS Residual=5994850, DV: Fcorte					
Factor	SS	df	MS	F	p
Corrente (%calor) L	236840452	1	236840452	39,50732	0,000000
Corrente (%calor) Q	1214332	1	1214332	0,20256	0,654729
Tempo (ciclos) L	63227263	1	63227263	10,54693	0,002151
Tempo (ciclos) Q	1845202	1	1845202	0,30780	0,581665
Força (bar) L	88683687	1	88683687	14,79331	0,000360
Força (bar) Q	485400	1	485400	0,08097	0,777238
Corrente (%calor) x Tempo (ciclos)	41448817	1	41448817	6,91407	0,011522
Corrente (%calor) x Força (bar)	7571267	1	7571267	1,26296	0,266799
Tempo (ciclos) x Força (bar)	10827267	1	10827267	1,80609	0,185429
Error	281757967	47	5994850		
Total SS	734098014	56			

Tabela 4.10 - Tabela de efeitos estimados referente aos factores mais influentes na força de corte de soldadura para varão de 6 mm (STATISTICA)

Effect Estimates; Var.:Fcorte; R-sqr=,58603; Adj.,55418 (6 mm.sta) 3 factors, 1 Blocks, 57 Runs; MS Residual=5844188, DV: Fcorte										
6 mm										
Factor	Effect	Std. Err.	t(52)	p	-95,% Cnf. Limt	+95,% Cnf. Limt	Coeff.	Std. Err. Coeff.	-95,% Cnf. Limt	+95,% Cnf. Limt
Mean/Interc.	10415,44	320,2025	32,52766	0	9772,91	11057,97	10415,44	320,2025	9772,91	11057,97
Corrente (%calor)	4808,64	755,3637	6,36599	0	3292,89	6324,38	2404,32	377,6819	1646,44	3162,19
Força (bar)	-2942,5	755,3637	-3,89547	0,000281	-4458,24	-1426,75	-1471,25	377,6819	-2229,12	-713,37
Tempo (ciclos)	2484,54	755,3637	3,2892	0,001807	968,79	4000,29	1242,27	377,6819	484,4	2000,14
Corrente(%calor) x Tempo(ciclos)	2628,33	986,9303	2,66314	0,010281	647,91	4608,75	1314,17	493,4651	323,96	2304,38

Tabela 4.11 - Tabela ANOVA referente aos factores influente na força de corte de soldadura para varão de 8 mm (STATISTICA)

ANOVA; Var.:Fcorte; R-sqr=,59054; Adj.:51214 (8 mm.sta) 3 factors, 1 Blocks, 57 Runs; MS Residual=5173167, DV: Fcorte					
Factor	SS	Df	MS	F	p
Corrente (%calor) L	92880400	1	92880400	17,95426	0,000105
Corrente (%calor) Q	6526967	1	6526967	1,26170	0,267035
Tempo (ciclos) L	192485009	1	192485009	37,20835	0,000000
Tempo (ciclos) Q	5230670	1	5230670	1,01112	0,319785
Força (bar) L	36285673	1	36285673	7,01421	0,010975
Força (bar) Q	7239016	1	7239016	1,39934	0,242784
Corrente (%calor) x Tempo (ciclos)	256060	1	256060	0,04950	0,824904
Corrente (%calor) x Força (bar)	1170858	1	1170858	0,22633	0,636460
Tempo (ciclos) x Força (bar)	12875885	1	12875885	2,48898	0,121354
Error	243138845	47	5173167		
Total SS	593810086	56			

Tabela 4.12 - Tabela de efeitos estimados referente aos factores mais influentes na força de corte de soldadura para varão de 8 mm (STATISTICA)

Effect Estimates; Var.:Fcorte; R-sqr=,59054; Adj.: 51214 (8 mm.sta) 3 factors, 1 Blocks, 57 Runs; MS Residual=5173167, DV: Fcorte										
8 mm										
Factor	Effect	Std. Err.	t(52)	p	-95,% Cnf. Limt	+95,% Cnf. Limt	Coeff.	Std. Err. Coeff.	-95,% Cnf. Limt	+95,% Cnf. Limt
Mean/Interc.	16094,58	300,1484	53,62208	0	15492,56	16696,6	16094,58	300,1484	15492,56	16696,6
Tempo (ciclos)	4335,03	708,0557	6,12245	0	2914,85	5755,21	2167,52	354,0279	1457,43	2877,61
Corrente (%calor)	3011,31	708,0557	4,25293	0,000086	1591,13	4431,49	1505,66	354,0279	795,57	2215,75
Força (bar)	-1882,18	708,0557	-2,65824	0,010362	-3302,36	-462	-941,09	354,0279	-1651,18	-231

4.3.2 Funções resposta

As funções resposta, para cada diâmetro (6 mm - Equação 4.1 e 8 mm - Equação 4.2), são expressas de seguida e derivam dos coeficientes das variáveis, consideradas influentes.

4.3.2.1 Diâmetro de 6 mm:

$$F_{\text{corte}} = 10415,44 + 2404,32 \cdot I + 1242,27 \cdot t - 1471,25 \cdot F + 1314,17 \cdot I \cdot t, \{I, t, F\} \in \mathbb{R}$$

Equação 4.1

Da função resposta pode-se notar o grau de influência das variáveis de processo, segundo esta ordem:

1. Corrente;
2. Força de aperto;
3. Tempo;
4. Conjugação entre a corrente e o tempo.

4.3.2.2 Diâmetro de 8 mm:

$$F_{\text{corte}} = 16094,58 + 1505,66 \cdot I + 2167,52 \cdot t - 941,09 \cdot F, \{I, t, F\} \in \mathbb{R}$$

Equação 4.2

A ordem de influência de variáveis do processo, para o varão de diâmetro 8 mm, é a seguinte:

1. Tempo;
2. Corrente;
3. Força de aperto.

4.3.3 Influência dos parâmetros de soldadura

Ao analisar as funções resposta e as tabelas de efeitos, nota-se que existe uma alteração na importância dos parâmetros de soldadura consoante o diâmetro, o que indica que este é um parâmetro do processo.

Como foi constatado, com o aumento de diâmetro de varão de 6 mm para 8 mm, existiu uma alteração do parâmetro de maior influência, passando da corrente para o tempo, sendo o esperado, segundo a *Lei de Joule* que se mantivesse a corrente como parâmetro mais influente. Esta alteração pode ser justificada através do aumento da área a percorrer pela corrente, que irá

necessitar de mais tempo, em vez de maior intensidade, por forma a gerar um núcleo de soldadura de maior dimensão e aumentando a área da soldadura, aumentando assim a sua resistência.

Os valores das funções de resposta relativos à força de corte são expressos em Newton, mas são representados pelos seus valores normalizados (níveis do planeamento). Por isso, foi necessário proceder a uma conversão para unidades SI, de modo a compreender a grandeza das influências de cada variável.

Os gráficos seguintes foram obtidos através das funções de resposta e mostram as curvas da força da soldadura em relação aos parâmetros mais influentes com os seus valores reais equivalentes.

4.3.3.1 Diâmetro de 6 mm

Pode-se notar que nas duas figuras seguintes (Figura 4.2 e Figura 4.3) a variação da corrente afecta o declive da curva de variação com o tempo e vice-versa, uma vez que existe uma correlação entre a corrente e o tempo, como se constatou na função resposta para o varão de 6 mm (Equação 4.1).

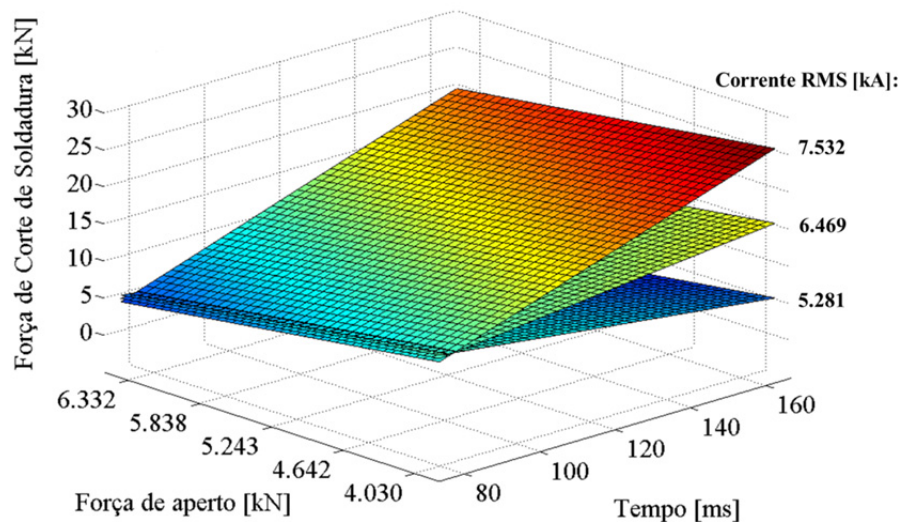


Figura 4.2 - Variação da força de soldadura, com variação de corrente, para varões de 6 mm

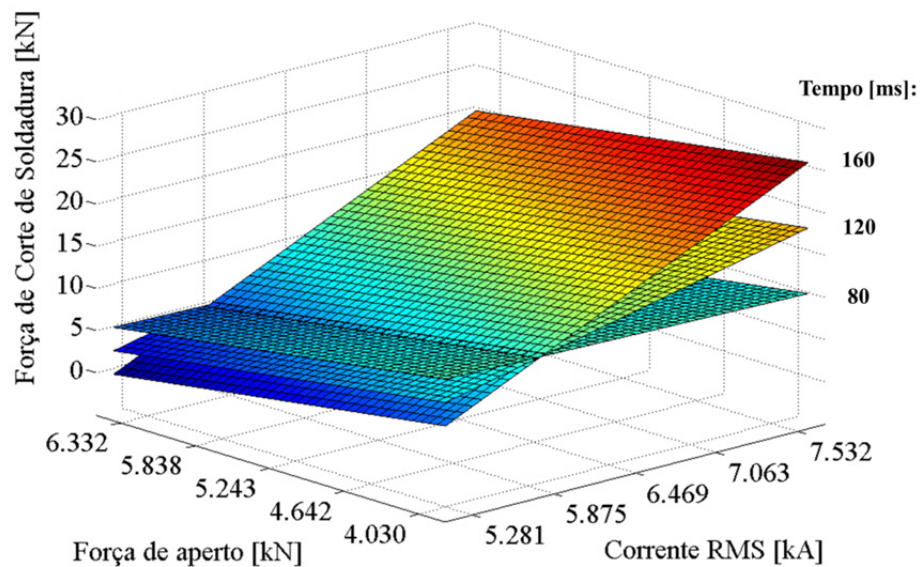


Figura 4.3 - Variação da força de soldadura, com variação de tempo, para varões de 6 mm

Esta alteração de declive nas figuras mencionadas, é bastante perceptível na Figura 4.4, em que é fixo o parâmetro força de aperto e onde se nota que quanto maior for o tempo, maior será influência da corrente na força de soldadura, verificando-se o mesmo para o aumento da importância do tempo devido ao aumento da corrente. Os declives apresentados são não lineares, mas são constantes com a variação da força de aperto.

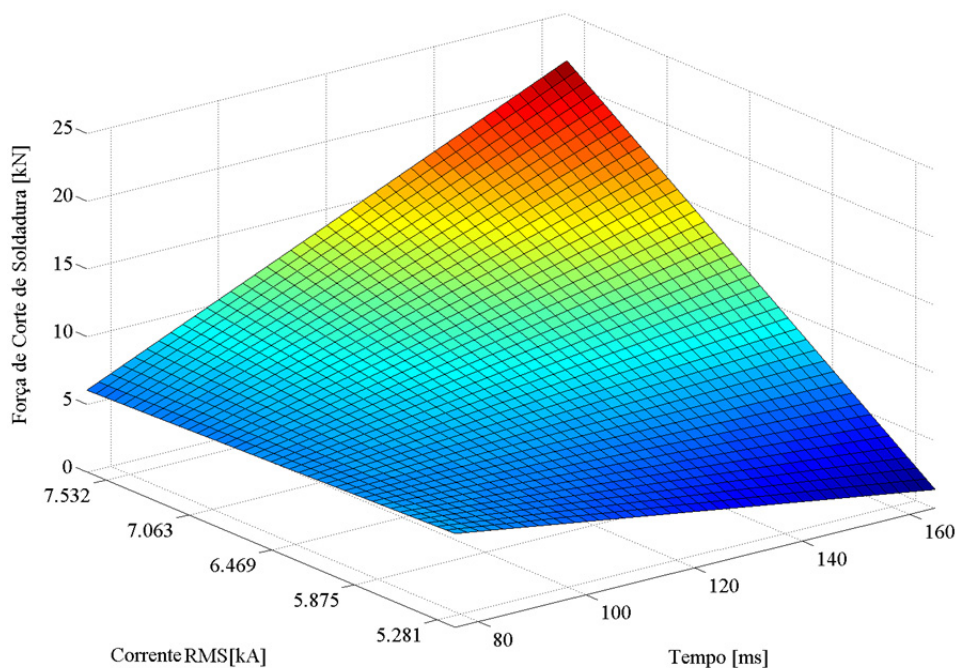


Figura 4.4 - Variação da força de soldadura, com força de aperto constante de 5,838kN, para varões de 6 mm

4.3.3.2 Diâmetro de 8 mm:

Como para o varão de 8 mm as variáveis não têm correlações, os declives apresentados não sofrem alterações independentemente do nível, sendo por isso fixado um nível para cada figura.

No caso da Figura 4.5 e Figura 4.6, o declive das variáveis com mais influência (tempo e corrente) são superiores ao declive da variável menos influente (força de aperto).

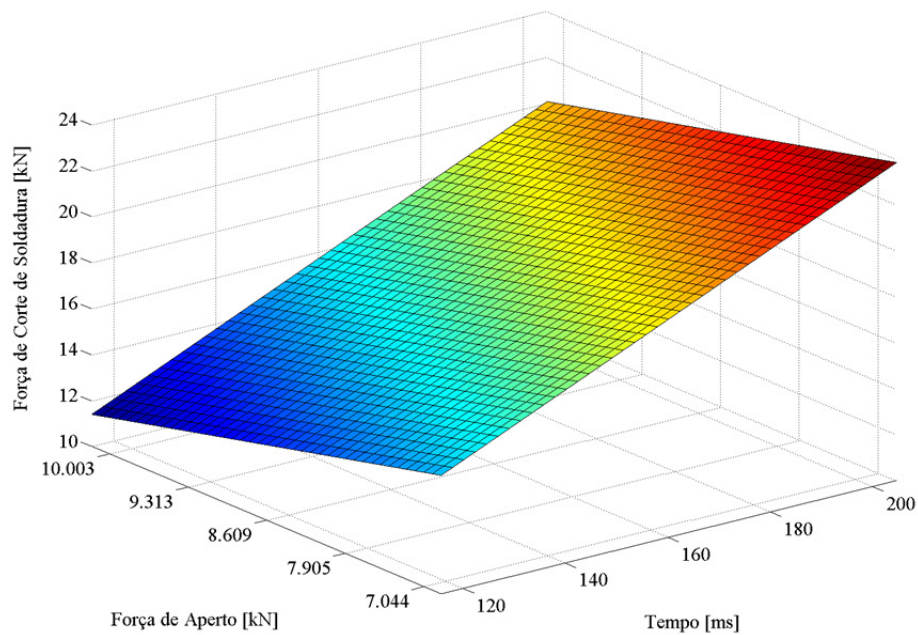


Figura 4.5 - Variação da força de soldadura, com corrente constante de 9,944kA, para varões de 8 mm

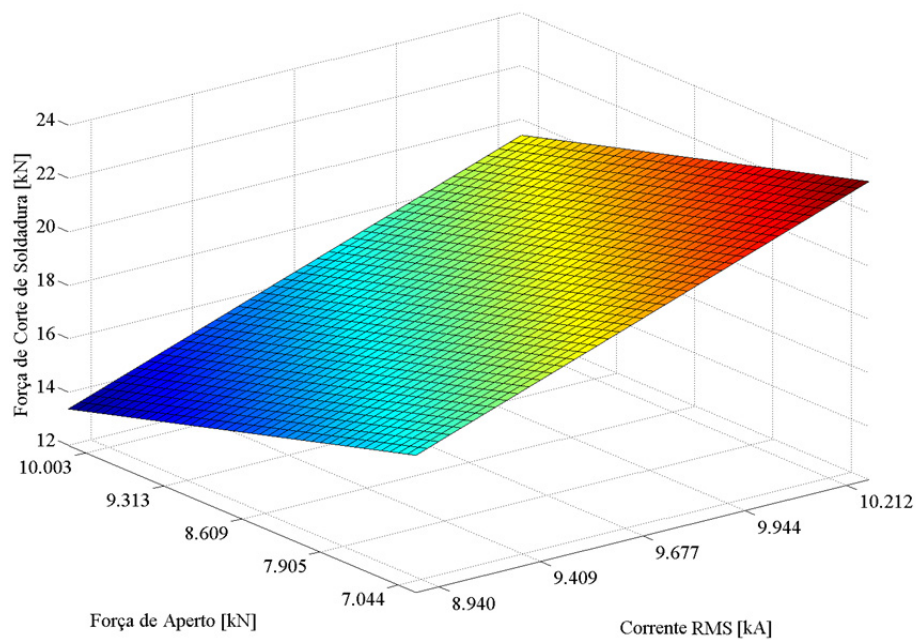


Figura 4.6 - Variação da força de soldadura, com tempo constante de 180ms, para varões de 8 mm

A Figura 4.7 apresenta as variáveis mais influentes, onde se pode reparar que ambas as variáveis têm declives próximos, sendo o do tempo superior ao da corrente, como se pode comprovar através da função resposta para o varão de 8 mm (Equação 4.2).

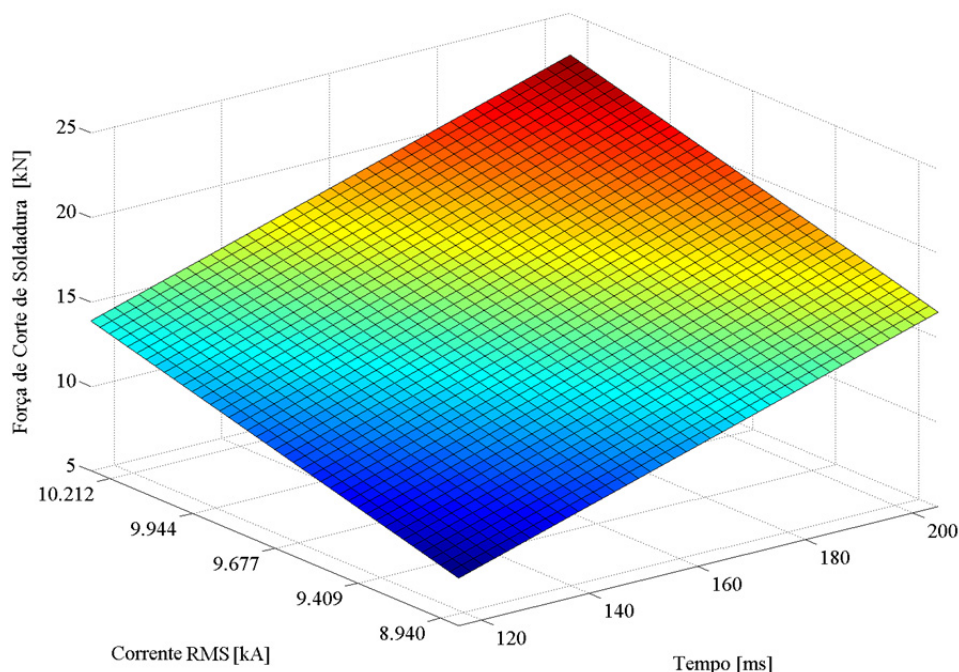


Figura 4.7 - Variação da força de soldadura, com força de aperto constante de 9,313kN, para varões de 8 mm

De acordo com o estudo realizado por *Lin, et al* [24] para aço, as curvas dos diferentes parâmetros em relação à força de corte, comportam-se de maneira semelhante às obtidas no presente estudo, tendo em conta as limitações relativas às gamas de valores de cada variável. Ou seja, o intervalo de valores de parâmetros testados não foi tão extenso como no estudo supracitado [24], não se obtendo assim um valor de declive nulo ou próximo, de modo a existir um valor máximo de força de corte para cada variável.

Ainda referente às curvas de influência de cada um dos parâmetros, pode-se notar que os seus declives são lineares, com a excepção das curvas pertencentes à corrente e ao tempo de soldadura no varão de 6 mm, onde a função resposta, gerada pelo *software STATISTICA*, apresenta uma relação entre ambas as variáveis referidas.

Neste caso particular e através da Figura 4.8, apresenta-se a relação entre estes dois parâmetros, uma vez que a influência do tempo na força de corte altera-se significativamente com a variação da corrente. Apesar da análise estatística efectuada não ter em atenção as características físicas do processo, é possível chegar a uma explicação física da correlação destes parâmetros.

Segundo a *equação de Joule*, a corrente tem um efeito quadrático o que implica que quanto maior for a corrente utilizada, mais influência irá ter o tempo na geração de calor, que originará maior núcleo de soldadura, originando uma maior força de corte, o que é consistente com o estudo realizado por *S. Aslanlar* [25] e *M. Pouranvari, et al* [26].

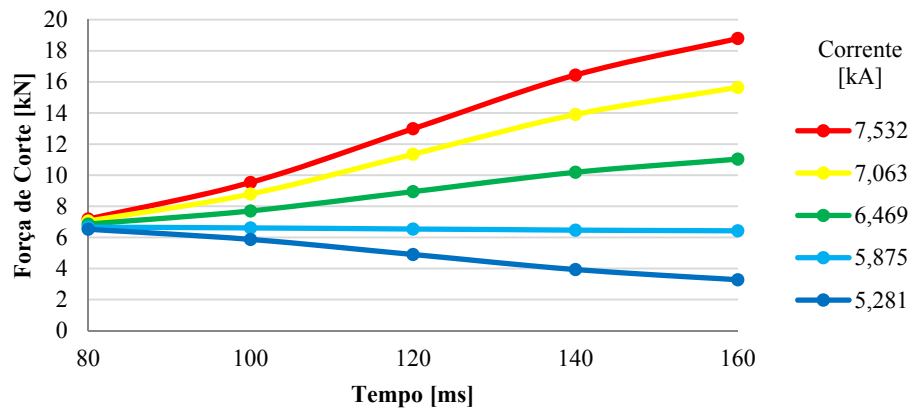


Figura 4.8 - Relação cruzada entre a corrente e tempo de soldadura para varão de diâmetro de 6 mm

4.3.3.3 Resistência dinâmica

O parâmetro força de aperto não tem um efeito directo na equação de *Joule*, mas influencia directamente a resistência, que tem efeito no calor gerado e consequentemente na força de corte de soldadura.

Esta influência tem um papel fundamental, como se pode verificar nos resultados referentes às resistências dinâmicas (Figura 4.9 e Figura 4.10), em que o seu comportamento é idêntico e constante para ambos os diâmetros de varões referenciados e constata-se a diminuição do valor da resistência, com o aumento do tempo e também da força de aperto, tal como no estudo apresentado por *H. Tang, et al* [11].

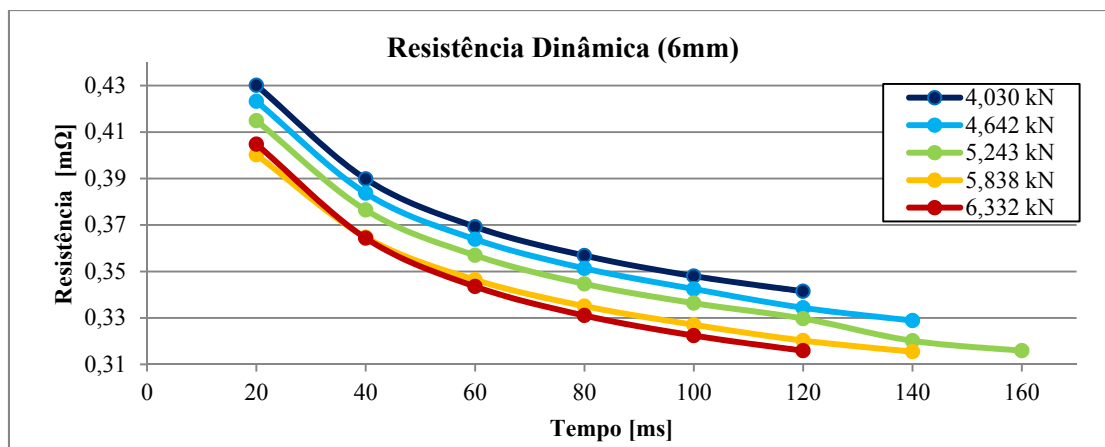


Figura 4.9 - Resistência dinâmica em relação ao tempo e força de aperto para varão de 6 mm de diâmetro

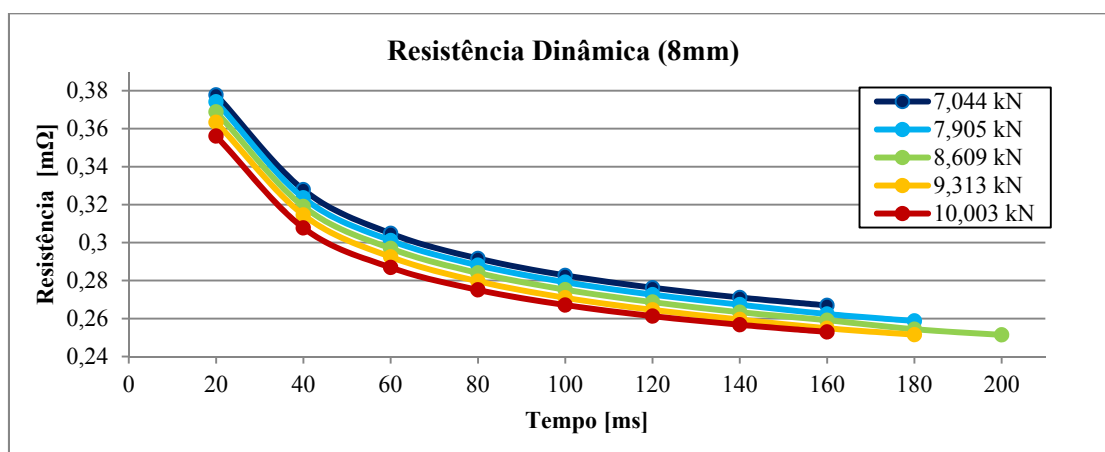


Figura 4.10 - Resistência dinâmica em relação ao tempo e força de aperto para varão de 8 mm de diâmetro

O resultado apresentado, pode ser explicado, através do efeito a que está sujeito o provete no instante antes da realização da soldadura, ou seja, como o provete é constituído por dois varões nervurados, a sua área inicial de contacto, apesar de variável, é mínima e quanto maior for a sua força de aperto inicial, maior será a área de contacto, uma vez que existe esmagamento de nervuras. O aumento de força provoca uma diminuição da resistência de contacto por aumento da área real de contacto, como já se referiu anteriormente.

Durante a fase de soldadura, constata-se que a sua resistência total, que engloba a resistência dos materiais (aço do varão e cobre do eléctrodo) e resistência de contacto (varão-varão e varão-eléctrodo) diminui da mesma forma para as diferentes forças e para os dois diâmetros de varão.

O aumento da temperatura diminui a dureza do material, mas aumenta a sua resistividade. Estes factores, têm influências contrárias na resistência eléctrica total durante o processo de soldadura.

No caso de chapas, a resistência eléctrica ao longo do processo de soldadura diminui, mas não apresenta um comportamento monotónico, ou seja, existem fases onde esta diminui, estabiliza ou aumenta, como foi estudado por Quanfeng Song, et al. [12]. Uma vez que a variação de área de contacto durante o processo pode ser desprezada, o efeito cruzado entre a área de contacto e a resistividade na resistência dinâmica é reduzido.

No caso de varão, esta relação é bastante diferente e pode ser justificada, com facto de a área de contacto (Figura 4.11) durante esta fase do processo, aumentar significativamente mais do que a resistividade do material, provocando assim uma diminuição monotónica ao longo do processo.

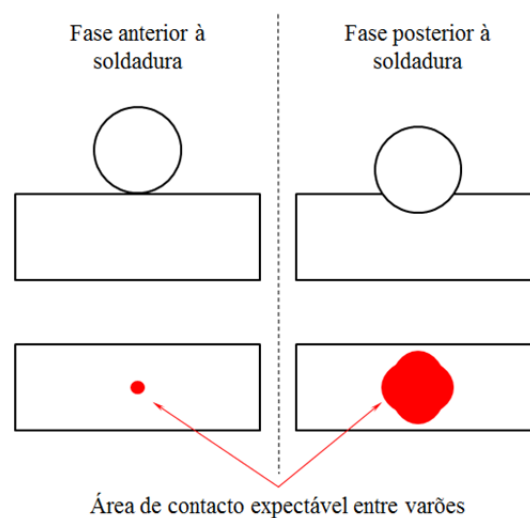


Figura 4.11 - Área de contacto expectável entre varões em diferentes fases da soldadura

4.3.4 Influência do estado dos eléctrodos

Durante a fase de realização de ensaios, verificou-se que o estado dos eléctrodos afecta o processo. Assim, procedeu-se à limpeza dos mesmos por forma a minimizar os erros associados.

A Figura 4.12 mostra a diferença entre as forças de corte de soldadura associadas a ensaios com os mesmos parâmetros e que ocorreram antes e depois da limpeza de eléctrodos, para ambos os diâmetros. Utilizou-se a média aritmética das forças de corte para cada ensaio e obtém-se uma linearização, onde se pode notar que para cada recta existe um declive muito semelhante para ambos os diâmetros.

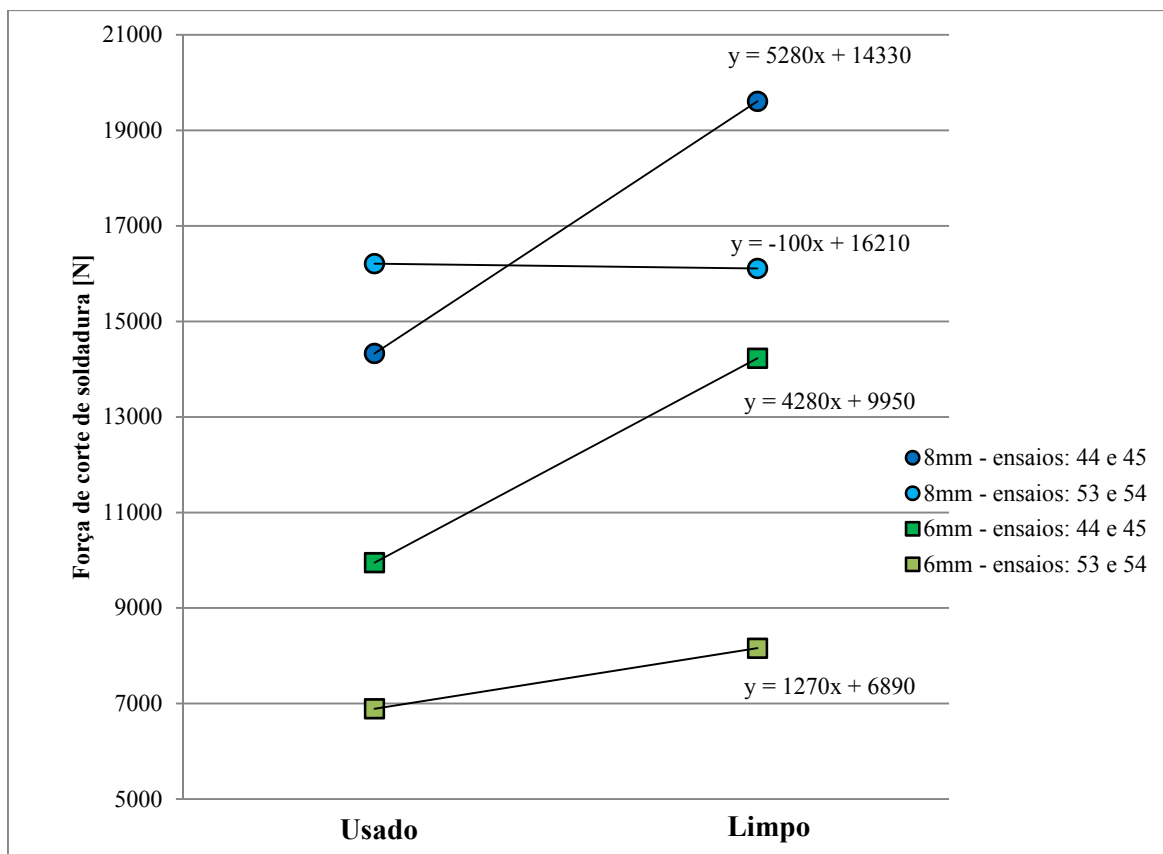


Figura 4.12 - Força de corte relativa aos ensaios realizados com eléctrodos usados (ensaios 44 e 53) e limpos (ensaios 45 e 54)

De modo a poder justificar os valores das forças de corte apresentadas, calculou-se o calor gerado em cada ensaio através da lei de *Joule*. Os gráficos seguintes mostram o calor gerado ao longo do processo de soldadura para ambos os ensaios e ambos os diâmetros.

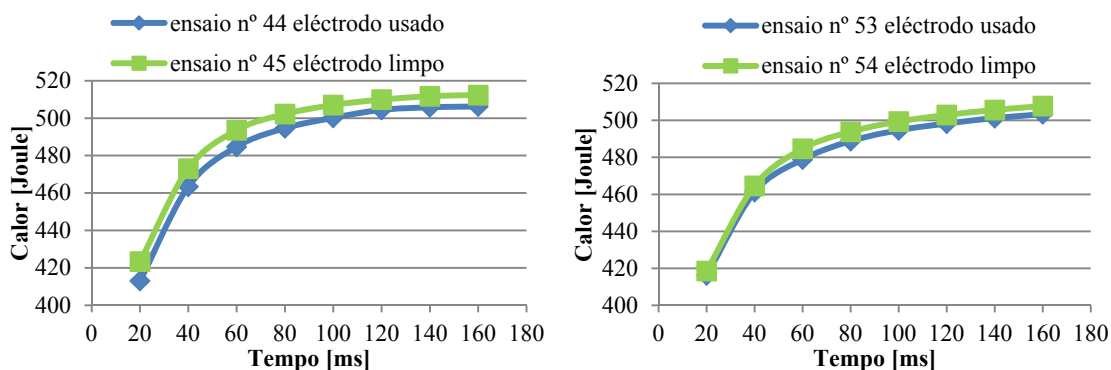


Figura 4.13 - Calor gerado durante a soldadura com eléctrodos usados e limpos para varão de 8 mm

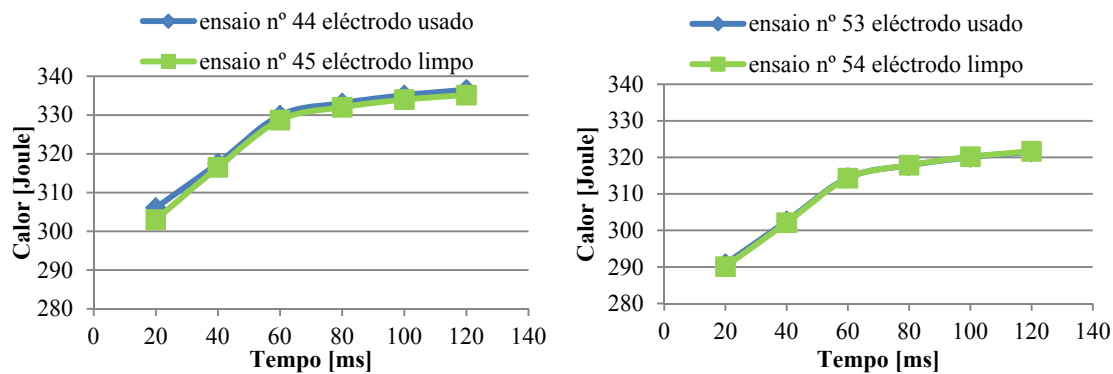


Figura 4.14 - Calor gerado durante a soldadura com eléctrodos usados e limpos para varão de 6 mm

Pode-se notar que no caso do varão de 8 mm o calor gerado com os eléctrodos limpos apresenta um valor superior ao gerado através dos eléctrodos usados em ambos os ensaios.

Os gráficos referentes ao varão de 6 mm mostram que o calor gerado com eléctrodos usados é ligeiramente superior num caso e idêntico noutro.

A inconsistência proporcionada na análise de ambos os varões não permite sustentar uma conclusão acerca da influência do estado dos eléctrodos em relação à geração de calor e da força de corte de soldadura, sendo possível afirmar que o estado dos eléctrodos influencia de certa forma o calor gerado, que por sua vez influencia a força de soldadura.

Esta análise requer um estudo mais aprofundado, que está fora do âmbito desta dissertação.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Com base no estudo efectuado, conclui-se que o grau de influência dos parâmetros de SRP na qualidade da soldadura, varia com o diâmetro do varão. Esta conclusão contraria de certa forma, a base da soldadura por resistência, na medida em que, sendo o processo controlado por efeito de Joule a influência da corrente teria de ser sempre mais importante na quantidade de calor gerada do que o tempo. Contudo observou-se experimentalmente, que na SRP de varão de 6 mm a corrente é o parâmetro mais influente enquanto, que na soldadura do varão de 8 mm, o tempo é o parâmetro mais influente na resistência mecânica da junta.

As características mecânicas do varão não são influenciadas pela soldadura, excepto a ductilidade nos pontos soldados, a qual é alterada localmente. A tensão de cedência (R_{eH}) e a razão das tensões de rotura e de cedência (R_m / R_{eH}) são características intrínsecas do material e dependem do seu estado inicial.

Conclui-se ainda que a força de corte de soldadura diminui com o aumento da força de aperto, uma vez que esta provoca uma diminuição da resistência de contacto causando uma diminuição da quantidade de calor gerada.

Relativamente ao estado dos eléctrodos confirma-se a sua influência no processo uma vez que, afecta o calor gerado e por conseguinte a resistência de soldadura. No entanto, não foi possível a evidenciar este facto.

5.2 Desenvolvidos futuros

Com o objectivo de efectuar um estudo mais aprofundado, em que seja possível contemplar o diâmetro como variável do processo, seria importante a execução do Planeamento 1, para o que é necessário um equipamento de soldadura com maior capacidade e melhores características, que o protótipo utilizado neste estudo.

Outro aspecto interessante seria caracterizar a influência do estado dos eléctrodos na força de corte da soldadura, de modo a quantificar a sua importância no processo de SRP.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] Hongyan Zhang & Senkara Jacek, *RESISTANCE WELDING - Fundamentals and Applications*, 1st ed. New York, USA: Taylor & Francis Group, 2006.
- [2] James Sheire. (1975, July) National Register of Historic Places Inventory-Nomination: Elihu Thomson House / Elihu Thomson Administration Building. [Online].
<http://pdfhost.focus.nps.gov/docs/NHLS/Text/76002002.pdf>
- [3] Helena Maria Fazendeiro Pardal Monteiro, "Estudo Paramétrico de optimização de Soldadura por Resistência Eléctrica por Pontos," Universidade do Porto, Porto, Tese de Mestrado 2000.
- [4] A.C. Davis, *The science and practice of welding - Volume 2 - The practice of welding*, 10th ed. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1993.
- [5] Welding technology Corp. (2011, Agosto) Welding technology Corp. [Online].
<http://www.weldtechcorp.com/index.php/learning-center/47-mfdc-tx>
- [6] SWANTEC. (2010, Dec.) Parameters in resistance welding. [Online].
<http://www.swantec.com/parameters-in-resistance-welding.php>
- [7] AWS, *"Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes"*, 7th ed. Florida, Estados Unidos da América: American Welding Society, 1980.
- [8] Matuschek Messtechnik GmbH. (2011, Agosto) Matuschek. [Online].
http://www.matuschek.de/html/en/gleichstrom_mittelfrequenz.htm
- [9] Welding R&D Group, Centerline special machinery Division, "A comparison of AC and Mid-Frequency DC projection welding," *CenterLine Technical brief*, 2002.
- [10] Welding Technology Machines. (2011, Jan.) Resistance Welding Processes and Equipments. [Online]. <http://www.welding-technology-machines.info/resistance-welding-processes-and-equipments/resistance-welding-processes-and-equipments.htm>
- [11] W. Hou and S J Hu H. Tang, "Forging force in resistance spot welding," *Professional Engineering Publishing*, vol. 216, pp. 957-968, Julho 2002.
- [12] Wenqi Zhang, and Niels Bay Quanfeng Song, "An Experimental Study Determines the Electrical Contact Resistance in Resistance Welding," *Supplement to The Welding Journal*,

pp. s-73 - s-76, Maio 2005.

- [13] Min Jou, "Experimental investigation of resistance spot welding for sheet metals used in automotive industry," *JSME International Journal*, vol. 44, pp. 544-552, 2001.
- [14] Donald F. Maatz Jr., "RWMA - Q&A - Electrode Type," *Welding Journal*, vol. 88, pp. 32,33, May 2009.
- [15] W. Zhang, N. Bay P. Wu, "Characterization of dynamic mechanical properties of resistance welding machines," *Welding Journal*, pp. 17-20, Janeiro 2005.
- [16] Nigel Scotchmer, "The other resistance process: cross wire welding," *Welding journal*, pp. 36-39, Dezembro 2007.
- [17] LNEC, "Redes Electrossoldadas para Armaduras de Betão Armado," Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Documentação Normativa E 458 - 2008, 2008.
- [18] LNEC, "Varões de Aço A500 NR de Ductilidade Especial para Armaduras de Betão Armado," Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Documentação Normativa E460 - 2010, 2010.
- [19] ISO, "Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test Methods - Part2: Welded fabric," International Standard, Genova, Documentação Normativa 15630-2:2010, 2010.
- [20] Carla Maria Moreira Machado, "Modelos estatísticos para a caracterização de texturas produzidas por electroerosão," Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, Tese de Mestrado 2002.
- [21] Douglas C. Montgomery, "*Design And Analysis Of Experiments*", 5th ed. ARIZONA STATE UNIVERSITY, United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [22] Michael Hamda C. F. Jeff Wu, "*Experiments, planning, analisys, and parameter design optimization*". New York, United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [23] ISO, "Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test Methods - Part1: Reinforcing bars, wire rod and wire," International Standard, Genova, Documentação

Normativa 15630-1:2010, 2010.

- [24] H.L. Lin, T. Chou, and C.P. Chou, "Modelling and optimization of the resistance spot welding process via Taguchi-neural approach in the automobile industry," *Automobile engineering*, vol. 222, pp. 1385-1393, 2008.
- [25] S. Aslanlar, "The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry," *Materials and design*, vol. 27, pp. 125-131, 2006.
- [26] M. Pouraarinvari, H.R. Asgari, S.M. Mosavizadch, P.H. Marashi, and M. Goodarzi, "Effect of weld nugget size on overload failure," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12, pp. 217-225, 2007.

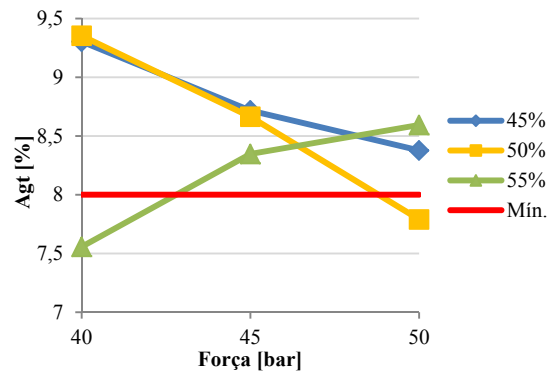
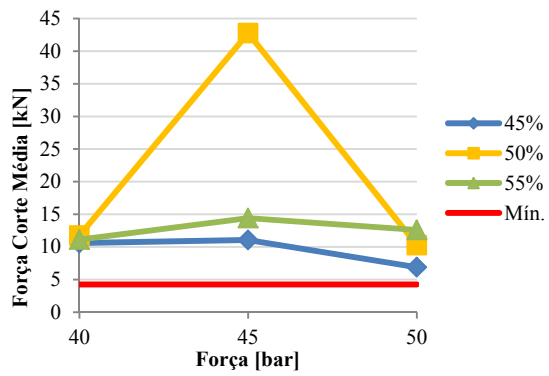
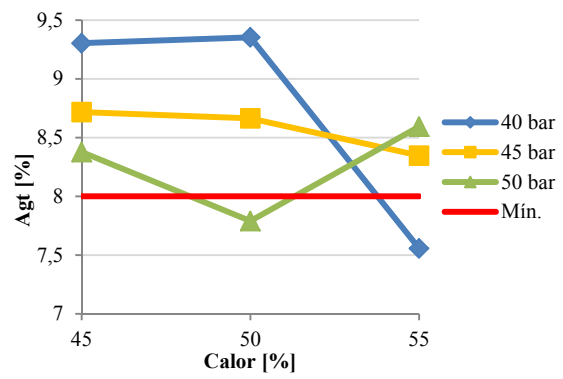
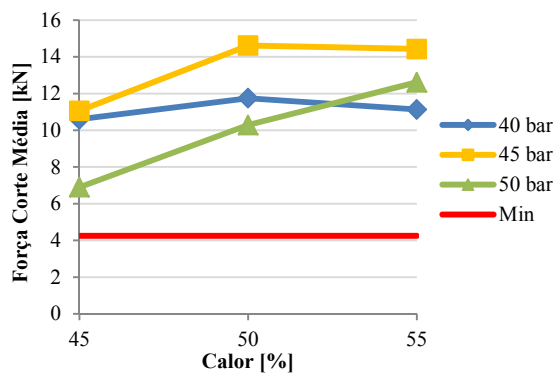
ANEXOS

A1 Resultados dos ensaios preliminares de força de corte de soldadura para varões de 10 mm de diâmetro

Pressão (bar)	Tempo (ciclos)	Corrente (% ht)	Força Corte (N)
90	10	95	16280
90	10	95	11690
90	10	95	5540
90	10	100	11220
90	10	100	8900
90	10	100	5404
95	10	95	5940
95	10	95	13500
95	10	95	7640
95	10	100	6220
95	10	100	6220
95	10	100	5640
100	10	95	8260
100	10	95	7790
100	10	95	9660
100	10	100	10480
100	10	100	9980
100	10	100	10200
100	10	95	4340
100	10	95	12100
100	10	95	6020
100	10	95	9780
100	10	95	10860

100	10	95	11600
100	10	100	9520
100	10	100	8520
100	10	100	6580
100	12	100	3140
100	12	100	7380
100	12	100	5500
80	10	100	6860
80	10	100	6840
80	10	100	7660
90	10	100	28280
90	10	100	20420
90	10	100	ERRO
90	10	100	11460
90	10	100	7820
90	10	100	7260
80	10	100	9240
80	10	100	3500
80	10	100	10980
80	14	100	15380
80	14	100	11480
80	14	100	13200
90	14	100	14600
90	14	100	3500
90	14	100	6620

A2 Resultados dos ensaios de despistagem para varão de 6 mm



A3 Resultados dos ensaios de despistagem para varão de 8 mm

